

VERS DES OPTIONS DE RECYCLAGE DE RÉSIDUS DE VERRE PLUS PERFORMANTES : LE QUÉBEC SAURA-T-IL
IMPLANTER UNE GESTION PLUS DURABLE DU VERRE?

Par
Nicholas Chevalier

Essai présenté au Centre universitaire de formation
en environnement et développement durable en vue
de l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Monsieur François Lafortune

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

JUIN 2018

SOMMAIRE

Mots clés : verre, gestion des matières résiduelles, consigne, ajouts cimentaires, calcin, micronisation, implosion du verre, poudre de verre micronisée, verrier, développement durable

Cet essai a pour principal objectif de déterminer si le Québec possède les outils, les technologies, les ressources et la volonté de développer une gestion durable des résidus de verre générés sur son territoire. Depuis la fermeture de l'usine de conditionnement Klareco en 2013, le Québec éprouve des difficultés à valoriser le verre issu des centres de tri. La matière, hautement contaminée, ne répond pas aux besoins des recycleurs, expliquant que seuls 14 % du verre provenant de la collecte sélective sont recyclés. Dans ce contexte, des organisations privées et publiques travaillent de concert dans l'espoir de développer une matière peu contaminée, ainsi que des débouchés à haute valeur ajoutée pour valoriser cette dernière.

Cet essai analyse le problème sous différents angles afin d'établir si les efforts récents ont amélioré le sort des résidus de verre générés, et si la gestion de ces derniers est plus durable qu'auparavant. Pour ce faire, les méthodes de collecte du verre sont revues. La possibilité d'appliquer la consigne aux contenants de vins et spiritueux afin d'améliorer la qualité de la matière est considérée. À cette fin, l'analyse de faisabilité d'un tel projet a été décortiquée et adaptée en fonction du contexte actuel. Par la suite, l'impact environnemental des débouchés du verre, incluant l'utilisation de calcin dans la fabrication de contenants de verre, a été analysé. Cet exercice a permis de déterminer si cette matière pouvait être recyclée de façon écologique. Cet essai s'est également intéressé à des débouchés à valeur ajoutée. L'utilisation du verre comme ajout cimentaire dans le béton pourrait permettre une réduction substantielle des émissions de gaz à effet de serre. Pour percer dans ce domaine, certaines entreprises québécoises développent la micronisation du verre, une technique conférant au verre des propriétés qui pourraient faciliter sa valorisation. Ces innovations permettraient au Québec de diversifier ses débouchés locaux pour les résidus de verre, tout en développant de nouveaux marchés. Les traitements du verre dans les centres de tri sont également considérés. Parmi ceux-ci, la nouvelle technologie d'implosion développée par Krysteline pourrait être la réponse au problème de pureté du verre issu des usines de tri. L'essai termine sur des recommandations à l'intention des acteurs privés et publics du verre. Parmi celles-ci, il est suggéré de réétudier et potentiellement renouveler, au terme des projets pilotes du plan Verre l'innovation, le système de consigne. Il est également conseillé de développer de nouveaux débouchés diversifiés tout en protégeant les recycleurs actuels. Enfin, il est recommandé de favoriser l'usage de matériaux recyclés et locaux dans les travaux publics et le génie civil afin de diminuer l'impact environnemental de ces secteurs.

REMERCIEMENTS

Je tiens à adresser mes premiers remerciements à François Lafortune, un directeur d'essai incomparable, mais également une personne merveilleuse. Ses commentaires, ses suggestions, et son savoir m'auront permis d'écrire un essai pertinent et de meilleure qualité que ce dont j'aurais pu espérer. C'est toutefois sa passion, sa générosité, sa curiosité, son ouverture d'esprit, sa compréhension, son calme et son désir de partager ses connaissances qui m'auront fait grandir et qui, je l'espère, transpireront de cet essai.

J'aimerais également remercier Michel Babeu, François Carrier et Colette Lemieux pour leur temps et pour m'avoir partagé leur expérience et leurs connaissances.

Merci à ma copine pour son appui indéfectible, sa compréhension aveugle et sa présence apaisante même en périodes moins exaltantes. Merci d'avoir enduré mes humeurs changeantes et de m'avoir encouragé à tout moment.

Merci à ma famille pour leurs encouragements et pour m'avoir changé les idées à des moments où j'en avais besoin. Merci à mes parents pour leur soutien au cours de toutes ces études, pour m'avoir poussé à me questionner et pouvoir m'avoir inculqué dès mon jeune âge les valeurs qui m'ont finalement fait aboutir dans ce merveilleux domaine. Ils seront sans doute heureux d'apprendre que je commence un nouveau bac en septembre. (Mais non, c'est une blague !)

Merci à mes amis/maître-en-devenir (et à ma collègue de classe) qui m'ont offert des distractions incroyables au cours des deux dernières années. Leur capacité à jongler entre sérieux, humour, folie, et ineptie m'a permis de me sentir à ma place, et à me donner la force de compléter cette maîtrise.

Merci aux concepteurs de logiciels de chez Microsoft qui ont programmé la sauvegarde automatique de la suite Office. Vos actions m'ont sauvé quelques crises d'hystérie.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1. LE VERRE	4
1.1 Le verre comme matériau	4
1.1.1 Histoire du verre	4
1.1.2 Propriétés et composition du verre	5
1.1.3 Types de verre	8
1.1.4 Traitement des verres	10
1.1.5 Autres matériaux apparentés.....	11
1.2 Production et utilisation du verre creux au Québec	11
1.2.1 Utilisation de verre au Québec.....	11
1.2.2 Producteurs de verre creux au Québec.....	13
1.2.3 Enjeux de l'industrie de la fabrication du verre québécoise	14
2. LES MÉTHODES DE GESTION DES RÉSIDUS DE VERRE	19
2.1 Élimination.....	19
2.1.1 Enjeux environnementaux.....	19
2.1.2 Enjeux sociaux	22
2.1.3 Enjeux économiques.....	22
2.1.4 Autres enjeux.....	23
2.2 Recyclage et autres techniques de valorisation	23
2.2.1 Collecte de porte à porte.....	24
2.2.2 Consigne de contenants à remplissage unique	25
2.2.3 Apport ou dépôt volontaire.....	29
2.3 Réemploi	31
3. EXEMPLES D'APPLICATION DES MÉTHODES DE GESTION DES RÉSIDUS DE VERRE AU QUÉBEC ET AILLEURS.....	34
3.1 Normes et objectifs de récupération du verre au Québec	34
3.1.1 Politique québécoise de gestion intégrée des déchets solides (1989)	34
3.1.2 Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008	35
3.1.3 Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 2011-2015	36

3.2	La consigne	36
3.2.1	Évolution de la consigne au Québec	37
3.2.2	Les freins à la consigne	39
3.2.3	Applications de la consigne au Canada	48
3.3	La collecte sélective de porte à porte	52
3.3.1	Applications de la collecte sélective de porte à porte au Québec	52
3.4	L'apport volontaire.....	54
3.4.1	Applications de l'apport volontaire au Québec.....	54
3.4.2	Applications de l'apport volontaire en France	58
4.	DÉBOUCHÉS CONVENTIONNELS DU VERRE RÉCUPÉRÉ.....	61
4.1	Matériau de recouvrement dans les lieux d'enfouissement	61
4.2	Sous-fondation de routes.....	62
4.3	Nouveaux contenants de verre	63
4.3.1	Impacts positifs.....	63
4.3.2	Défis et contraintes	64
4.3.3	Analyse de cycle de vie	65
4.4	Verre de filtration.....	71
4.5	Sablage au jet de verre	72
4.6	Laine de verre.....	73
5.	INNOVATIONS DANS LA VALORISATION DU VERRE	75
5.1	Traitement et conditionnement traditionnels des résidus de verre.....	75
5.2	Innovations en matière de conditionnement des résidus de verre.....	76
5.2.1	Implosion du verre	76
5.2.2	Micronisation du verre	77
5.3	Nouveaux débouchés à valeur ajoutée pour le verre récupéré.....	78
5.3.1	Le verre comme ajout cimentaire dans les bétons	78
5.3.2	Agrégats dans le béton.....	91
5.3.3	Le verre comme additif industriel	91
6.	PERSPECTIVE DE LA GESTION DU VERRE AU QUÉBEC SELON LE CONTEXTE ACTUEL	93
6.1	Analyse de la gestion des résidus de verre selon le développement durable	94

6.1.1	Dimension de la gouvernance	94
6.1.2	Dimension environnementale	96
6.1.3	Dimension économique.....	98
6.1.4	Dimension sociale.....	99
6.2	Conclusions.....	100
7.	RECOMMANDATIONS POUR UNE GESTION DURABLE DU VERRE AU QUÉBEC.....	102
7.1	Recommandations sur les connaissances et l'accès au savoir.....	102
7.2	Recommandations économiques et technologiques.....	104
7.3	Recommandations environnementales	105
	CONCLUSION	106
	LISTE DES RÉFÉRENCES	109
	BIBLIOGRAPHIE.....	125
	ANNEXE 1 – QUESTIONS POSÉES À FRANÇOIS CARRIER LORS DE LA VISITE DE L'USINE MONTRÉLAISE D'OWENS-ILLINOIS	128
	ANNEXE 2 – BILAN DES MODIFICATIONS EFFECTUÉES POUR LA MISE À JOUR DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE DU CIRAIG CONCERNANT LES CONTENANTS DE BIÈRE AU QUÉBEC.....	131
	ANNEXE 3 – STATISTIQUES DE VENTES ET DE RÉCUPÉRATION DES CONTENANTS À REMPLISSAGE UNIQUE DE VERRE CONSIGNÉS AU QUÉBEC	132
	ANNEXE 4 – SPÉCIFICATIONS PHYSICO-CHIMIQUES DU CALCIN COMME MATIÈRE SECONDAIRE DANS LA PRODUCTION DE CONTENANTS DE VERRE PAR OWENS-ILLINOIS MONTRÉAL	134
	ANNEXE 5 – DÉTAILS ET PARAMÈTRES DES SCÉNARIOS DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE DE QUANTIS SUR LA GESTION DES RÉSIDUS DE VERRE ISSUS DES CENTRES DE TRI AU QUÉBEC	137
	ANNEXE 6 – CENTRES DE TRI QUÉBÉCOIS TESTANT LA TECHNOLOGIE D'IMPLOSION KRYSTELINE	139
	ANNEXE 7 – LES 16 PRINCIPES DE DÉVELOPPEMENT DURABLE TELS QUE DÉCRITS À L'ARTICLE 6 DE LA LOI SUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE	140

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1 Développement des matériaux selon les années	6
Figure 1.2 Arrangement tétraédrique des molécules de SiO ₂ sous sa forme cristalline de quartz.....	6
Figure 1.3 Diagramme de phase d'un cristal, d'un verre et de leur liquide associé	7
Figure 1.4 Représentation d'un solide cristallin et d'un solide amorphe	8
Figure 2.1 Émissions de gaz à effet de serre par étape du cycle de vie des contenants de bière selon l'étude mise à jour	33
Figure 3.1 Fonctionnement de la consigne	38
Figure 3.2 Taux de récupération des contenants à remplissage unique en verre consignés	39
Figure 3.3 Enjeux, défis, risques et contraintes liés à l'implantation d'un système de consigne sur les contenants de vins et spiritueux	45
Figure 3.4 Exemples de conteneurs semi-enfouis qui pourraient permettre l'entreposage des contenants consignés vides.....	47
Figure 3.5 Conteneur de récupération avant (gauche) et après (droite) sa transformation	56
Figure 3.6 Évolution de la récupération de résidus de verre par apport volontaire à Saint-Denis-de-Brompton	57
Figure 3.7 Évolution du taux de recyclage du verre en France	59
Figure 4.1 Comparaison de l'impact sur les changements climatiques de différents scénarios de valorisation des résidus de verre issus des centres de tri au Québec	65
Figure 4.2 Ajustement du scénario étudié par Quantis afin de ne considérer que l'impact de la production de verre à partir de calcin sur les changements climatiques	67
Figure 4.3 Scénarios ajustés afin de ne considérer que l'impact de la production de verre à partir de calcin sur les changements climatiques	68
Figure 4.4 Contribution du transport dans l'indicateur changements climatiques pour les scénarios étudiés par Quantis	69
Figure 4.5 Ajustement des scénarios en considérant les pertes de matières premières lors de la calcination des carbonates	70
Figure 4.6 Exemple de tuiles de verre recyclé de l'entreprise Eco-Friendly Flooring	71
Figure 5.1 Schéma d'un broyeur à boulets	78
Figure 5.2 Distribution de matériaux cimentaires en fonction de leur composition chimique	81

Figure 5.3 Comparaison de l'impact sur les changements climatiques de différents scénarios de valorisation des résidus de verre issus des centres de tri au Québec	87
Figure 5.4 Ajustement du scénario étudié par Quantis	88
Tableau 1.1 Quantités de résidus de verre générés au Québec en 2015	12
Tableau 1.2 Stœchiométrie de la décomposition thermique par calcination du carbonate de calcium ...	16
Tableau 1.3 Stœchiométrie de la décomposition thermique du carbonate de sodium	16
Tableau 1.4 Stœchiométrie de la production de verre par fusion d'une tonne de matières premières, suivi d'une vitrification par refroidissement rapide	16
Tableau 1.5 Procédé de fabrication de verre à partir de verre recyclé.....	17
Tableau 2.1 Coefficients d'émission de gaz à effet de serre pour les différentes matières provenant de la collecte sélective et de la consigne.....	26
Tableau 2.2 Amplitude des impacts environnementaux des contenants de bière.....	32
Tableau 3.1 Génération, élimination et récupération de matières résiduelles au Québec en 1998 et 2008	36
Tableau 3.2 Financement et manque à gagner pour un système de consigne sur les contenants de vins et spiritueux	41
Tableau 3.3 Financement et manque à gagner ajustés pour un système de consigne sur les contenants de vins et spiritueux.....	42
Tableau 3.4 Financement et manque à gagner pour un système de consigne sur les contenants de vins et spiritueux selon un taux de récupération basé sur la consignation des CRU actuels	44
Tableau 3.5 Contenants visés par le Programme de consignation de l'Ontario	50
Tableau 3.6 Contenants visés par le Beverage Container Stewardship Program Regulation	51
Tableau 3.7 Évolution des quantités de résidus de verre récupérés vendus aux courtiers, conditionneurs et recycleurs québécois	54
Tableau 4.1 Coût matériel et économique de la fabrication de 150 000 tonnes de contenants de verre à partir de matières premières ou secondaire	63
Tableau 4.2 Modification des paramètres des scénarios de l'étude de Quantis afin de ne considérer que la production de verre à partir de calcin	67
Tableau 4.3 Différences entre les scénarios de Quantis pour la production de bouteilles de verre ou de laine de verre à partir de calcin	74

Tableau 5.1 Composition chimique d’ajouts cimentaires de source recyclable	81
Tableau 5.2 Production canadienne de pouzzolanes artificielles et utilisation dans le béton au Canada	82
Tableau 5.3 Prix du ciment et d’ajouts cimentaires aux États-Unis	84
Tableau 5.4 Quantités de gaz à effet de serre émis par les cimenteries	85
Tableau 5.5 Émissions de GES pour la production d’une tonne de ciment ou d’ajout cimentaire	86
Tableau 5.6 Différence entre le scénario de Quantis et le scénario modifié pour le projet d’utilisation de la poudre de verre comme ajout cimentaire	88

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

ABQ	Association des brasseurs du Québec
ACV	Analyse de cycle de vie
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AFÉAS	Association féminine d'éducation et d'action sociale
Al ₂ O ₃	Oxyde d'aluminium(III)
B ₂ O ₃	Sesquioxyde de bore
BAPE	Bureau d'audiences publiques en environnement
CaCO ₃	Carbonate de calcium
CaO	Oxyde de calcium (chaux vive)
Ca(OH) ₂	Hydroxyde de calcium (portlandite)
CC	Changements climatiques
CH ₄	Méthane
CIRCA	<i>Association of Canadian Industries Recycling Coal Ash</i>
CMAP	<i>Chicago Metropolitan Agency for Planning</i>
CO ₂	Dioxyde de carbone
CRD	Construction, rénovation et démolition
CRF	<i>Container recycling fee</i> (Frais de recyclage de contenant)
CRM	Contenant à remplissage multiple
CRU	Contenant à remplissage unique
CSA	Association canadienne de normalisation
C-S-H	Silicate de calcium hydraté
DD	Développement durable
ECCC	<i>Environment and Climate Change Canada</i>
Eurima	<i>European Insulation Manufacturers Association</i>
FADOQ	Fédération de l'âge d'or du Québec
FCQGED	Front commun québécois pour une gestion écologique des déchets
GES	Gaz à effet de serre
GMR	Gestion des matières résiduelles
ICI	Industries, commerces et institutions
ISE	Information, sensibilisation et éducation
LCBO	<i>Liquor Control Board of Ontario</i> (Régie des alcools de l'Ontario)

LEDCE	Lieu d'enfouissement de débris de construction et démolition
LEET	Lieu d'enfouissement en tranchées
LET	Lieu d'enfouissement technique
LHF	Laitier de haut-fourneau
LQE	Loi sur la qualité de l'environnement
m ³	Mètre cube
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MDDEP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs
MRC	Municipalité régionale de comté
N ₂ O	Protoxyde d'azote (oxyde nitreux)
Na ₂ CO ₃	Carbonate de sodium
Na ₂ O	Oxyde de sodium
NAIMA	<i>North American Insulation Manufacturers Association</i>
PbO	Oxyde de plomb
PFE	Prélèvement pour le fonds environnemental
PGMR	Plan de gestion des matières résiduelles
PTMOBC	Programme de traitement des matières organiques par biométhanisation et compostage
PVM	Poudre de verre micronisée
REIMR	Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles
SAQ	Société des alcools du Québec
SiO ₂	Dioxyde de silicium
SPEDE	Système québécois de plafonnement et d'échange de droits d'émission
TBS	<i>The Beer Store</i>
T _f	Température de fusion
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
Δ	Chaleur

LEXIQUE

Analyse de cycle de vie :	Évaluation, quantification et comparaison des impacts environnementaux d'un ou plusieurs produits ou services, en considérant l'extraction des matières premières, la gestion en fin de vie et toutes les autres phases entre ces dernières. (RECYC-QUÉBEC, 2017c)
Apport volontaire :	Mode de récupération d'une matière par collecte sélective selon laquelle le générateur d'une matière résiduelle la dépose dans un point de collecte public (conteneur, borne, cloche, etc.) au moment de son choix. (ADEME, 2016a)
Calcin :	Verre broyé utilisé comme matière secondaire dans l'industrie du verre. (RECYC-QUÉBEC, 2010a)
Centre de tri :	Entreprise et son usine qui s'assure du tri des matières résiduelles dans le but de favoriser leur valorisation. (RECYC-QUÉBEC, 2017c)
Collecte de porte à porte :	Type de collecte sélective au cours de laquelle les récupérateurs se déplacent d'une adresse résidentielle ou commerciale à l'autre, couvrant un territoire déterminé, pour collecter les matières résiduelles séparées par type (matières recyclables, matières organiques, déchets ultimes, etc.) ou non. (ADEME, 2016c)
Collecte sélective :	« Mode de récupération qui permet de cueillir des matières résiduelles pour en favoriser la mise en valeur. » (RECYC-QUÉBEC, 2017c)
Consigne :	« Mode de récupération utilisant la perception d'une somme d'argent à l'achat d'un produit, remboursable en totalité ou partiellement, pour en favoriser la récupération après consommation. » (RECYC-QUÉBEC, 2017c)
Déchet ultime :	« Déchets non recyclables et non valorisables. » (Olivier, 2015)
Élimination :	Enfouissement ou incinération des déchets ultimes générés en fonction de la réglementation. (Olivier, 2015)
Équivalent CO ₂ :	Quantités de gaz à effet de serre (par exemple : méthane, dioxyde de carbone [CO ₂], protoxyde d'azote, etc.) exprimées en fonction du potentiel de réchauffement planétaire de chaque molécule en comparaison avec le CO ₂ . (Environnement Québec, s. d.)

Matière secondaire :	« Résidu récupéré, conditionné ou non, qui peut être utilisé dans un ouvrage ou un procédé de fabrication. » (RECYC-QUÉBEC, 2017c)
Récupération :	« Activité de collecte ou de traitement de matières secondaires aux fins de leur réemploi, de leur recyclage ou d'une autre forme de valorisation. » (Olivier, 2015)
Recyclage :	« Utilisation, dans un procédé manufacturier, d'une matière récupérée en remplacement d'une matière vierge. » (RECYC-QUÉBEC, 2017c)
Résidu de verre :	Objet ou morceau de verre rejeté dans le but d'être éliminé ou valorisé. (Olivier, 2015)
Valorisation :	« Terme générique qui englobe l'ensemble des techniques qui permettent le réemploi, la récupération ou le recyclage de matières résiduelles, dans le but de les détourner de l'élimination. » (RECYC-QUÉBEC, 2017c)

INTRODUCTION

Dans un monde où la recherche permet de développer des produits et matériaux toujours plus performants et qui répondent aux besoins réels ou artificiels de l'humain, le verre se démarque par la simplicité de sa fabrication. Encore largement utilisé aujourd'hui sous sa forme la plus sobre, le verre est apprécié pour ses propriétés uniques ; résistant à la chaleur, à la pression et durable dans le temps, il est également l'un des rares matériaux de construction permettant à l'homme de rester en contact avec son environnement grâce à sa transparence.

Le verre est également reconnu et prôné pour sa recyclabilité virtuellement infinie : le verre peut être refondu indéfiniment dans le but de lui redonner une nouvelle vie. Pourtant, l'enjeu principal du verre actuellement au Québec réside justement dans son recyclage. En effet, à la suite de la fermeture, en 2013, de l'usine de conditionnement de verre Klareco à Longueuil, le taux de recyclage du verre est passé de 43 % à 14 % entre 2012 et 2015 (Bussières, 2013, 29 juillet ; RECYC-QUÉBEC, 2017a). En fait, certains recycleurs sont prêts depuis longtemps à acheter des résidus de verre auprès des centres de tri. C'est le cas, notamment, de l'usine montréalaise de production de verre Owens-Illinois (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018). Cependant, il appert que les centres de tri ne réussissent pas à traiter le verre de façon à produire une matière assez pure pour la vendre aux recycleurs.   ce défi s'ajoute la problématique des résidus de verre pouvant contaminer les autres matières des centres de tri. En fait, selon 44 % des centres de tri ayant répondu à un sondage, le verre serait le plus gros problème des centres de tri québécois (Laroche Paquet, 2015).

Depuis la fermeture de l'usine Klareco, la société d' tat RECYC-QUÉBEC, l'organisme à but non lucratif  co Entreprises Québec (  Q), certains centres de tri, des conditionneurs et des recycleurs se sont impliqués dans l'espoir de régler la problématique du verre au Québec. Les différents acteurs du verre s'efforcent entre autres d'aider les centres de tri à améliorer la qualité des résidus de verre qui sortent de leurs installations. Pour ce faire, des projets pilotes ont été lancés, dans le cadre du plan Verre l'innovation d'  Q, afin de faire l'essai de nouveaux appareils et technologies. (  Q, 2018b) Dans le même espoir d'améliorer le sort des résidus de verre québécois, certaines organisations s'efforcent d'améliorer les propriétés de ce mati riau. Enfin, depuis quelques années, des acteurs du verre tentent de trouver ou développer de nouveaux débouchés à valeur ajoutée pour cette matière résiduelle.

Après plusieurs années de travaux et de partenariats dans le but de régler la crise du verre, il est pertinent de se demander si les avancées du Québec dans ce domaine ont porté ou porteront leurs fruits. En ce sens,

l'objectif du présent essai est de déterminer si le Québec saura implanter une gestion durable du verre comparativement à ce qui se faisait à l'époque où l'usine Klareco était en fonction.

Pour répondre à cette question, le premier chapitre de cet essai présente d'abord le verre et ses qualités. Cette entrée en matière permet de comprendre le caractère unique de ce matériau, tout en définissant les types de verre et leur recyclabilité. Le chapitre se poursuit sur l'industrie et le marché du verre au Québec. D'abord, des statistiques évaluent la génération, la récupération et le recyclage du verre au Québec. Ensuite, le contenu d'une entrevue avec le directeur de l'usine Owens-Illinois, à Montréal, met en relief les enjeux de cette industrie et l'importance du verre recyclé dans ses procédés.

Au cours du deuxième chapitre de l'essai, les méthodes possibles de gestion des résidus de verre sont présentées. Les concepts d'élimination, de recyclage, de collecte sélective, de consigne et de réemploi sont définis. Les avantages et les désavantages sont exposés pour chaque méthode de gestion. Le troisième chapitre est la suite logique du précédent. Il s'intéresse à la gestion québécoise du verre en commençant par la présentation des politiques provinciales de gestion des matières résiduelles (GMR). Ensuite, les systèmes québécois de consignes sont expliqués. Une analyse de faisabilité de l'implantation d'une consigne sur les contenants de vins et spiritueux, commandée par la Société des alcools du Québec (SAQ), est analysée afin de déterminer si un tel système pourrait être envisageable ou non. Par la suite, l'évolution de la collecte sélective de porte à porte est présentée dans le but de mieux saisir comment et pourquoi le Québec en est venu au système actuel. Enfin, des exemples québécois d'apport volontaire pour la collecte du verre sont présentés, démontrant si cette méthode de gestion présente un intérêt quelconque.

Le quatrième chapitre décrit les débouchés conventionnels et traditionnels des résidus de verre. Une analyse de cycle de vie (ACV), développée par le groupe Quantis pour le compte de RECYC-QUÉBEC, est utilisée pour appuyer la réflexion sur les avantages environnementaux de certaines des applications du verre. La production de contenants de verre à partir de résidus est largement étudiée afin de comprendre si ce débouché, déjà très développé au Québec, est réellement pertinent.

Le cinquième chapitre reprend là où le précédent se termine. Il s'intéresse d'abord au conditionnement du verre en mettant l'accent sur les technologies permettant d'améliorer la qualité ou les propriétés des résidus de verre, soit l'implosion du verre et la micronisation respectivement. Il présente ensuite les innovations en matière de débouchés du verre qui présentent une valeur ajoutée. Ces applications sont

analysées afin de déterminer s'ils peuvent être développés dans l'espoir de valoriser les résidus de verre de façon durable.

Le sixième chapitre tente de répondre à la question initiale de l'essai. Il analyse donc le contexte actuel de la gestion actuelle du verre au Québec, ainsi que les technologies et débouchés en cours de développement, et ce, selon les différentes dimensions du développement durable (DD).

Enfin, le dernier chapitre émet des recommandations dans le but de favoriser l'établissement d'une gestion durable du verre au Québec. Ces suggestions visent les méthodes de gestion des résidus générés, les technologies de conditionnement et les débouchés du verre. Elles sont émises à l'intention des différents acteurs impliqués dans le dossier du verre au Québec.

1. LE VERRE

Les propriétés du verre sont uniques et font de lui un choix populaire comme matériau de construction et comme emballage, notamment dans l'industrie de l'alimentation. Cette dernière met sur le marché, chaque année, des milliers de tonnes de contenants de verre, entre autres pour les boissons alcoolisées.

Afin de comprendre l'enjeu du recyclage du verre, il est d'abord important d'avoir une compréhension de ce dernier. La première section de ce document vise donc à offrir une vue d'ensemble du verre. Son histoire, ses propriétés et ses différents aspects seront d'abord abordés. Ensuite, l'utilisation du verre au Québec sera détaillée. Enfin, la production du verre au Québec et ses enjeux seront expliqués.

1.1 Le verre comme matériau

Connu depuis des milliers d'années, le verre est depuis très longtemps utilisé par l'humain. La présente portion de l'essai permet de mieux comprendre l'intérêt du verre au travers de son histoire et de ses propriétés. Ensuite, les différents types de verre et certains traitements développés au fil des années seront décrits.

1.1.1 Histoire du verre

Les matières vitreuses ont toujours existé à l'état naturel dans l'environnement de l'humain. Celles-ci sont issues de la fonte d'une matière riche en silice lors de phénomènes naturels à haute température. Par exemple, le passage d'un éclair dans le sable peut permettre la formation d'une fulgurite. De même, lors de son entrée dans l'atmosphère terrestre, une météorite peut voir la roche à sa surface fondre. L'impact de la météorite avec le sol terrestre permet la projection de cette roche fondue dans l'atmosphère et, par son refroidissement, la création d'un verre naturel nommé tectite. Enfin, les verres naturels les plus communs sont les roches volcaniques vitreuses telles que l'obsidienne et la tachylite. Celles-ci sont formées à la suite du refroidissement d'une roche riche en silice préalablement fondue par la chaleur d'un volcan. L'obsidienne, par exemple, est issue de sable fondu sous forme de lave. (British Glass Manufacturers Confederation, 2013 ; Musée canadien de l'histoire, s. d.)

L'ambre, un polymère organique, est également considéré comme un verre naturel puisqu'il répond à la définition d'un verre, c'est-à-dire qu'il s'agit d'un solide amorphe. Cette matière diffère toutefois des verres communs du fait qu'il est de source organique, qu'il ne contient pas nécessairement de silice et qu'il ne nécessite pas de traitement thermique pour sa formation. (Étienne et al., 2008 ; Than, 2013)

La première utilisation de matériaux vitreux reculerait à la période du Paléolithique, soit il y a plus de 12 000 ans (Amato, 1997). L'obsidienne était alors utilisée pour sa facilité relative à être taillée et son caractère coupant provenant de sa fracture conchoïdale. Au cours des millénaires, des miroirs et des outils tels que des couteaux ou des têtes de flèches ont été fabriqués à partir de ce matériel. (Encyclopædia Britannica, Inc., 2018a)

Selon les archéologues, les plus anciennes preuves d'un verre fabriqué par l'homme proviendraient d'Égypte et dateraient de 6 000 ans. De fines particules minérales riches en silices auraient alors été chauffées directement sur de la poterie, formant ainsi un revêtement de verre. Pour leur part, les objets les plus anciens entièrement formés de verre dateraient de 4500 ans et ont été trouvés notamment en Égypte et en Iraq. (Amato, 1997) Enfin, les premières pièces de verre creux, servant de contenants, dateraient de 3 500 ans (British Glass Manufacturers Confederation, 2013). Ces éléments étant réservés aux dirigeants, il fallut attendre l'invention du soufflage de verre en Syrie et en Palestine il y a 2000 ans pour que ce matériel devienne moins rare et plus abordable (Amato, 1997). Par la suite, l'expansion de l'Empire romain fut responsable de la diffusion du savoir du soufflage du verre en Europe. Au fil des années, Venise devint reconnue pour son travail du verre, notamment pour la fabrication de bouteilles. (British Glass Manufacturers Confederation, 2013) Au 15^e siècle, Venise était l'une des rares villes dont la majorité des habitations étaient munies de fenêtres en verre (Amato, 1997). La figure 1.1 montre la découverte des différents matériaux, notamment celle du verre 5 000 ans avant J.-C.

Le verre fut ensuite apprivoisé par les inventeurs, les scientifiques, les ingénieurs et les artistes. Les verres colorés ont fait leur apparition par l'ajout de pigments à la matière première. La composition des verres a été modifiée pour en améliorer les qualités. Les techniques de production ont également évolué pour augmenter la vitesse de production ou pour améliorer les caractéristiques du verre. De nos jours, plus de 10 000 types de verre existent (Baïlon, Dorlot, Haenny, Masounave et Rigaud, 1980).

1.1.2 Propriétés et composition du verre

Les propriétés physiques d'un verre dépendent de sa composition et de la vitesse de refroidissement de la matière liquéfiée. Cependant, indépendamment de ces facteurs, la plupart des verres sont reconnus pour leur transparence, leur résistance chimique et biologique, leur résistance à l'abrasion, leur résistance thermique, leur caractère inerte et leur recyclabilité virtuellement infinie. (Kopp Glass, 2016; Lenntech B.V., 2018; SCHOTT North America, Inc., 2018)

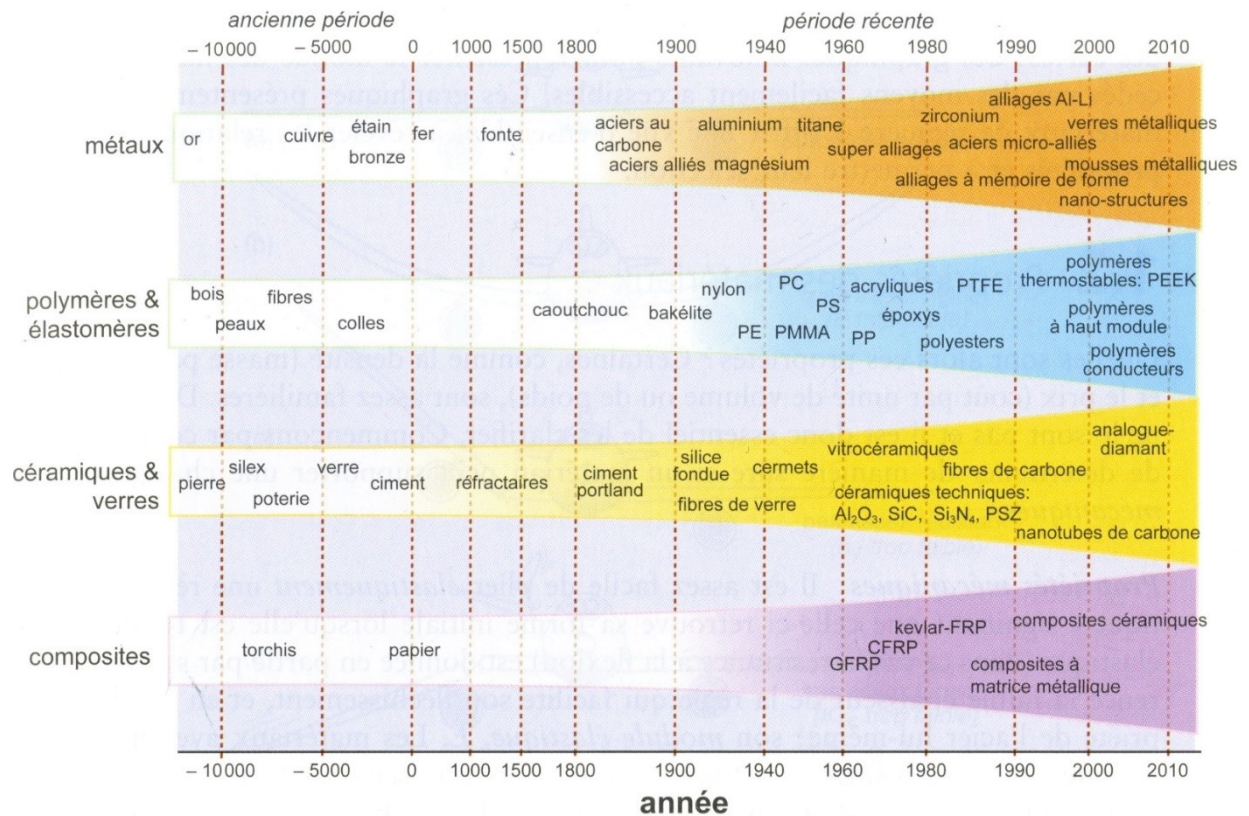


Figure 1.1 Développement des matériaux selon les années (tiré de : Ashby, Shercliff et Cebon, 2013, p. 3)

La matière première des verres les plus communément utilisés est le dioxyde de silicium (SiO_2). Cette molécule, très abondante dans la croûte terrestre, s'arrange naturellement sous forme de cristal pur. La forme organisée cristalline la plus abondante et stable du SiO_2 est le quartz, qui présente un arrangement en tétraèdre démontré à la figure 1.2. (Cotton, Wilkinson et Gaus, 1995 ; Olivier, 2009) Le SiO_2 peut également se présenter sous d'autres formes de cristaux qui présentent des arrangements organisés, mais moins stables, comme la cristobalite et la tridymite.

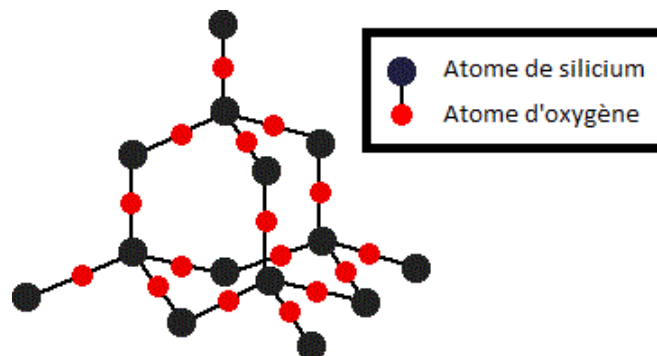


Figure 1.2 Arrangement tétraédrique des molécules de SiO_2 sous sa forme cristalline de quartz (inspiré de : Tangient LCC, 2018)

Comme tout solide, les cristaux de SiO_2 peuvent être fondus à une température spécifique, nommée température de fusion (T_f), soit à 1610°C (quartz), 1703°C (tridymite) ou 1713°C (cristobalite) (International Programme on Chemical Safety [IPCS], 2016a; IPCS, 2016b; IPCS, 2016c). En refroidissant lentement, le SiO_2 liquide s'organise et cristallise sous l'une des formes organisées et stables nommées précédemment. Cependant, lors d'un refroidissement rapide, le liquide ne peut s'organiser en cristal et les molécules figent dans le même désordre qu'un liquide, devenant un solide amorphe (Cotton, Wilkinson et Gaus, 1995). Dans le cas du SiO_2 , un tel solide amorphe est un verre. La figure 1.3 représente, sur un diagramme de phases, la relation entre la phase d'une substance en fonction de sa température. Un solide sous forme de cristal devient liquide à T_f . Le liquide obtenu, lorsque refroidi rapidement, ne peut s'arranger en cristal et devient un liquide en surfusion (supercooled liquid). À la température de transition vitreuse (T_g), le liquide en surfusion devient un solide amorphe : un verre (glass). La figure 1.4 représente la structure ordonnée d'un cristal comparativement à l'arrangement désordonné d'un solide amorphe.

À l'instar des changements de phases entre l'eau et la glace, la formation du verre est un procédé physique réversible et non pas une réaction chimique. Cette réalité explique la recyclabilité facile et virtuellement infinie du verre.

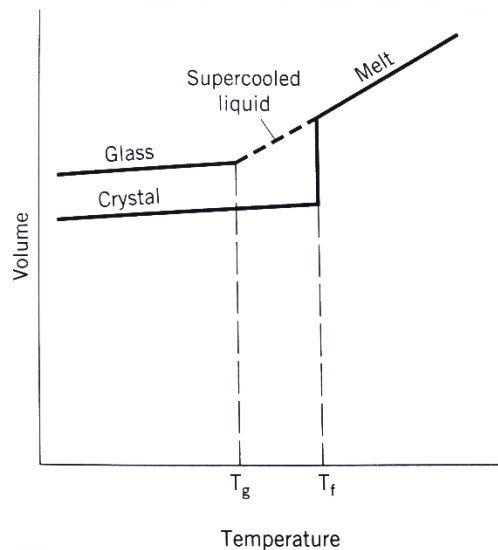


Figure 1.3 Diagramme de phase d'un cristal, d'un verre et de leur liquide associé (tiré de : Cotton, Wilkinson et Gaus, 1995, p. 775)

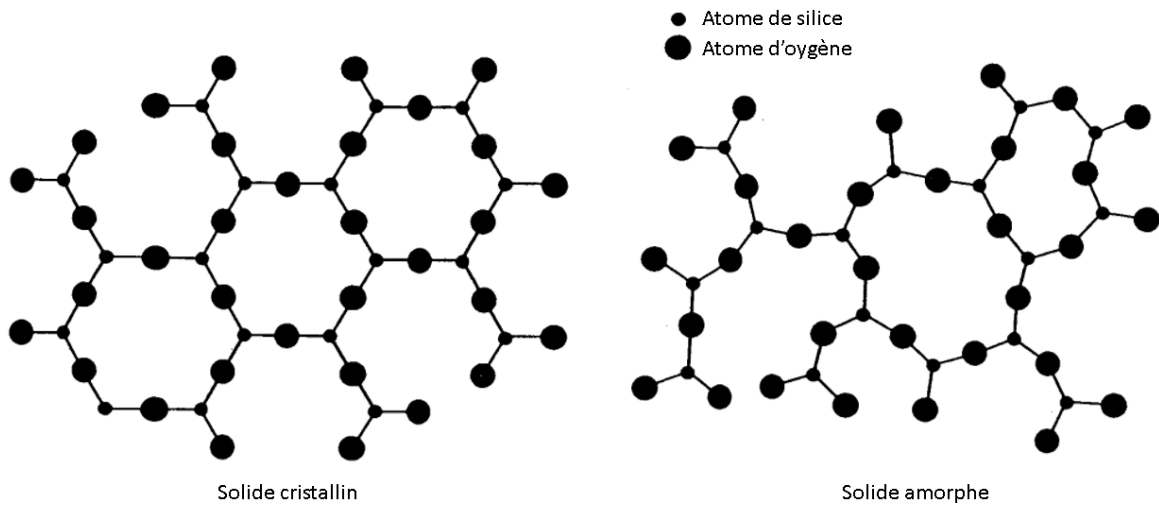


Figure 1.4 Représentation d'un solide cristallin et d'un solide amorphe (inspiré de : The Regents of the University of California, 2017)

Le silicium (Si) est également abondant sous forme de silicates : un arrangement polymérique où les monomères de SiO_2 forment des chaînes ou des couronnes chargées négativement. Ces charges négatives sont balancées par des ions positifs (cations) métalliques dont le plus commun est l'aluminium (Al^{3+}). Les nombreuses espèces qui combinent le SiO_2 à l'aluminium forment la famille des aluminosilicates. (Cotton, Wilkinson et Gaus, 1995 ; Olivier, 2009)

1.1.3 Types de verre

Comme vu à la section 1.1.2, la matière première principale de la grande majorité des verres est le SiO_2 . Un verre composé uniquement de SiO_2 amorphe est appelé verre de quartz. Cependant, considérant la T_f élevée de la matière première, la fabrication de ce verre est coûteuse en énergie. De plus, la viscosité élevée du SiO_2 rend ce matériel difficile à travailler (Baïlon et al., 1980). Pour ces raisons, différents ingrédients ont été ajoutés au SiO_2 pour :

- faciliter sa fabrication en grand volume et à faible coût ;
- atteindre les propriétés techniques voulues ;
- améliorer les qualités visuelles.

Ces modifications peuvent toutefois affecter la recyclabilité des verres, comme vu dans les sous-sections qui suivent.

Verres sodocalciques

Les verres les plus communs sont composés de SiO_2 , d'oxyde de sodium (Na_2O) et d'oxyde de calcium (CaO), d'où leur nom (Étienne et al., 2008). Ces ajouts permettent notamment de réduire la T_f du mélange d'ingrédients (Na_2O) et d'augmenter la résistance du verre qui en résulte (CaO) (Glass Packaging Institute, 2018a). L'abondance et le faible coût de ces ingrédients ainsi que la T_f abaissée permet la fabrication d'un verre très abordable et facilement recyclable par fusion à une température plus faible.

Verres borosilicatés

Les verres borosilicatés (pyrex) sont composés, entre autres, de SiO_2 et de sesquioxyde de bore (B_2O_3). Le bore permet de créer un réseau à haute connectivité de molécules liées. En effet, le bore favorise la formation d'une plus grande quantité de liaisons chimiques au sein du verre, ce qui en améliore la stabilité (Hubert et Faber, 2014). Pour cette raison, le pyrex a une excellente résistance thermique, expliquant son utilisation en laboratoire et en cuisine. (Kopp Glass, 2016) Pour cette même raison, la T_f du pyrex est plus élevée que le verre conventionnel. Il est donc plus difficile à recycler avec ce dernier (Citizen Communications, LLC, 2018b).

Verres au plomb

Un verre au plomb, aussi appelé cristal, contient un minimum de 24 % d'oxyde de plomb (PbO). Cette composition confère au verre une transparence et un indice de réfraction plus élevés que les verres sodocalciques. Ces qualités améliorent l'aspect visuel du verre et expliquent son utilisation en art, décoration et bijouterie. (Étienne et al., 2008) La composition unique du cristal en fait également un verre qui ne peut être recyclé avec les verres sodocalciques (Glass Packaging Institute, 2018b).

Verres alumino-silicates

Les verres alumino-silicates contiennent de l'oxyde d'aluminium(III) (Al_2O_3) qui confère au verre d'excellentes propriétés mécaniques, chimiques et thermiques. Ces verres sont utilisés comme matériaux à haute résistance thermique, notamment dans les ampoules, les matériaux de résistance électrique, etc. (SCHOTT, 2014) Considérant leur T_f supérieure aux verres sodocalciques, ces verres ne peuvent pas être recyclés avec les verres communs.

1.1.4 Traitement des verres

Les verres sodocalciques sont les verres les plus communs et sont utilisés notamment dans la fabrication de verres creux (bouteilles) et de verres plats (miroirs, vitrages). Ce verre, afin de répondre aux différents besoins, peut être traité de diverses façons. La section qui suit recense certains des traitements les plus communs, tout en expliquant leur impact sur la recyclabilité du verre.

Coloration du verre

Les verres peuvent être colorés dans des buts purement visuels ou pour atteindre des caractéristiques techniques. Par exemple, l'ajout d'ions de fer (Fe^{2+} et Fe^{3+}) à un verre permet d'absorber et de filtrer les rayonnements infrarouges et ultraviolets, d'où leur application dans les verres teintés notamment. (Étienne et al., 2008) Cette filtration des rayonnements peut notamment aider à la stabilité des produits emballés dans des contenants de verre et qui pourraient être dégradés à la lumière (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018).

L'ajout d'ions métalliques (fer, cuivre, nickel, cobalt, etc.) dans un verre permet d'atteindre une grande diversité de couleurs. La coloration peut également être atteinte par l'ajout de colloïdes d'or, d'argent ou de cuivre (dans le cristal), ou de particules semi-conductrices à base de cadmium. (Étienne et al., 2008)

Le recyclage de résidus de verre doit cependant passer par un tri des couleurs pour éviter, par exemple, de contaminer le verre clair (ou verre incolore) utilisé pour la production de verre creux incolore.

Verre trempé

Le verre trempé est utilisé pour la sécurité qu'il offre. Issu d'un procédé de refroidissement rapide, le verre ainsi traité bénéficie d'une résistance mécanique accrue et n'est pas coupant lorsqu'il se casse (Schneider Electric, 2018). Ce procédé confère également au verre une T_f supérieure aux verres non traités tels que les verres creux. De ce fait, le verre trempé ne peut pas être recyclé par fusion avec ceux non traités. (Verre Avenir, s. d.)

Verre feuilleté

Le verre feuilleté, également dit laminé, est constitué de plusieurs couches de verre plat entre lesquelles est placé un film de plastique. Ce film, souvent constitué de poly(butyracétate de vinyle) (PVB) ou d'éthylène-acétate de vinyle (EVA), permet de lier les feuilles de verre tout en augmentant leur résistance mécanique et thermique. La présence de ce film permet également de tenir le verre en place même s'il est brisé, ce

qui en fait un matériel idéal pour les parebrises de véhicules. Toutefois, la présence de cette feuille de plastique complique le recyclage du verre. (Tufwell Glass, 2016)

1.1.5 Autres matériaux apparentés

Les céramiques peuvent être apparentées aux verres puisqu'elles sont composées de matières premières riches en silice et en aluminium : argile, feldspath, kaolin, quartz, etc. Cependant, bien que certaines céramiques comme la porcelaine et le grès aient une surface dite « vitrifiée », le volume de la céramique ne présente pas le même désordre, la même pureté, ni la même densité. La céramique nécessite une cuisson, mais ne passe pas par une phase liquide. (Étienne et al., 2008) De ce fait, au contraire du verre, aucune matière première n'est ajoutée dans le but de réduire la T_f du mélange initial. Pour ces raisons, il est impossible de recycler la céramique avec les verres communs par fusion (Citizen Communications, LLC, 2018a).

Puisqu'il s'agit du verre le plus utilisé et qu'il est le plus simple à recycler, le présent essai s'intéressera principalement au verre sodocalcique.

1.2 Production et utilisation du verre creux au Québec

Comme partout ailleurs, le verre est largement utilisé au Québec. Les sous-sections qui suivent permettent de mieux comprendre l'enjeu du verre en détaillant son utilisation et en décrivant les enjeux auxquels fait face l'industrie du verre au Québec.

1.2.1 Utilisation de verre au Québec

Il est difficile d'estimer la quantité de verre consommé au Québec. Le verre recyclable, c'est-à-dire le verre creux de type sodocalcique, est principalement utilisé comme matériel d'emballage pour les produits des industries pharmaceutiques, chimiques et de l'alimentation. Le verre est apprécié par ces industries pour son caractère inerte, sa pureté, l'absence de produits toxiques pouvant migrer de l'emballage vers le produit, ainsi que pour sa transparence (Lenntech B.V., 2018; SCHOTT North America, Inc. 2018). Il est intéressant d'observer une augmentation de la popularité des emballages en verre en relation directe avec la hausse de production et de vente de produits dits « biologiques » ou « naturels ». Selon François Carrier, directeur de l'usine montréalaise Owens-Illinois de production de verre, les contenants en verre sont effectivement préférés par les producteurs de produits naturels ou biologiques pour la pureté de ce matériel (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018).

Puisqu'il s'agit d'emballages de consommables, on peut estimer que cette matière devient rapidement une matière résiduelle qui sera traitée comme tel. Comme présenté au chapitre 2, la majorité des résidus de verre québécois peut être éliminée, recyclée à la suite de la collecte sélective ou à la consigne publique, ou réemployée au terme de la consigne privée. En analysant les flux de résidus de verre au travers de ces différents traitements, il pourrait être possible d'approximer la quantité de verre creux consommé annuellement au Québec. Le tableau 1.1 présente la quantité, en tonnes, de verre traité par ces différentes méthodes.

Tableau 1.1 Quantités de résidus de verre générés au Québec en 2015 (compilation d'après : RECYC-QUÉBEC, 2017, p. 14 et p. 32)

	Verre récupéré par la collecte sélective (secteur résidentiel)	Verre envoyé aux conditionneurs et recycleurs (tous secteurs confondus)		
		Collecte sélective	Consigne publique	Consigne privée
Masse (tonne) de résidus de verre traités	156 000	23 000	24 000	8 000

D'abord, selon RECYC-QUÉBEC (2017a), 159 000 tonnes de résidus de verre du secteur résidentiel avaient été récupérées par la collecte sélective en 2012. Ce volume ne considère pas les consignes. Selon le même document, cette quantité aurait été 2 % plus basse en 2015, soit 156 000 tonnes de verre. De cette quantité, seules 22 000 tonnes de résidus de verre auraient été recyclées, soit 14 %. Cependant, ces quantités ne couvrent pas les autres secteurs (industries, commerces et institutions [ICI], ainsi que le secteur de la construction, de la rénovation et de la démolition [CRD]). De ce fait, le secteur de la restauration, un consommateur important de produits alimentaires et de boissons emballés dans des contenants de verres, n'est pas considéré.

Toujours selon RECYC-QUÉBEC (2017a), 55 000 tonnes de résidus de verre générés par les différents secteurs du Québec (résidentiel, ICI et CRD) auraient été envoyées aux conditionneurs et recycleurs québécois en 2015. De cette portion, 23 000 tonnes provenaient de la collecte sélective, 24 000 tonnes étaient issues de la consigne publique, et 8 000 tonnes de la consigne privée, c'est-à-dire de contenants à remplissage multiple (CRM) brisés ou trop usés pour être remplis à nouveau. Il est intéressant de noter que davantage de CRM sont utilisés annuellement, mais que chaque bouteille est réemployée plus de 15 fois.

N'ayant pas en main les quantités de verre consommées par les ICI, il est difficile de connaître la quantité de résidus de verre générés au Québec. Au cours du présent document, il sera donc considéré que les Québécois consomment un minimum de 156 000 tonnes de verre, soit la quantité générée par le secteur résidentiel.

1.2.2 Producteurs de verre creux au Québec

L'unique usine de production de verre creux au Québec est située à Montréal et est opérée par l'entreprise internationale Owens-Illinois. Forte de 78 usines réparties dans 23 pays, cette entreprise produisait, en 2014, environ 40 milliards de contenants en verre (Owens-Illinois, inc., 2014). La multinationale propose notamment des contenants en verre creux pour les industries alimentaires, pharmaceutiques et chimiques, ainsi que des bouteilles pour différents types de boissons alcoolisées ou non (Owens-Illinois, 2018b).

Pour sa part, l'usine montréalaise d'Owens-Illinois est en fonction depuis 1905 et a été dirigée sous différentes bannières. Le directeur de l'usine, François Carrier, a accepté de partager certaines informations lors d'une entrevue dans le cadre de cet essai. Les questions de cette entrevue se retrouvent à l'annexe 1. Selon François Carrier, l'usine montréalaise produit actuellement 1,6 million de contenants en verre creux quotidiennement, totalisant 450 tonnes de verre. La succursale est le principal fournisseur de contenants en verre des entreprises d'alimentation, des brasseries et des producteurs de spiritueux ayant des activités d'emballage ou d'embouteillage au Québec. Elle produit et fournit ainsi 95 % du marché québécois pour l'embouteillage de bières et 25 % pour l'embouteillage du vin. (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018)

Actuellement, Owens-Illinois Montréal inclut respectivement 40 % et 20 % de verre récupéré dans sa production de verre ambré et de verre clair. Ces quantités sont inférieures aux cibles d'Owens-Illinois international qui s'était lancé comme objectif, en 2009, d'inclure en moyenne 60 % de verre recyclé dans ses procédés en 2017 (Owens-Illinois, inc., 2014). Ultimement, monsieur Carrier souhaiterait utiliser 100 % de verre récupéré dans ses procédés de récupération. (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018)

L'approvisionnement en matière première de l'entreprise se fait majoritairement au niveau local. Le sable, extrait à St-Canut, représente grossièrement 80 % des matières premières utilisées dans le procédé de fabrication du verre chez Owens-Illinois Montréal. Le reste des matières premières proviennent notamment de Valleyfield. La matière secondaire, c'est-à-dire le verre récupéré, est achetée

majoritairement à des conditionneurs québécois (2M Ressources), néo-brunswickois et ontariens (NextCycle, Canadian Liquids Processors Limited). L'entreprise peut également s'approvisionner en verre récupéré au Vermont et dans l'état de New York. (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018)

Enfin, il est intéressant de mentionner que le procédé de fabrication du verre ne produit aucun déchet ultime. Tous les résidus de verre, c'est-à-dire les produits non conformes ou brisés, sont réutilisés comme matière secondaire. Pour sa part, l'eau utilisée dans l'usine, majoritairement à des fins de refroidissement, est incluse dans un système en boucle. La consommation d'eau est donc limitée dans le procédé. (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018)

1.2.3 Enjeux de l'industrie de la fabrication du verre québécoise

Comme vu précédemment, le verre jouit de certaines qualités uniques en tant que matériel d'emballage. Le fabricant québécois de verre creux Owens-Illinois fait toutefois face à des compétiteurs directs et indirects, soient respectivement les verriers asiatiques et les producteurs de contenants en plastique et en aluminium. Les producteurs de verre asiatiques offrent des produits de moindre de qualité, mais qui, malgré la distance que doivent parcourir ces contenants, ont un coût inférieur aux produits québécois. Cette compétition explique la part de marché relativement faible (25 %) d'Owens-Illinois dans le secteur québécois de l'embouteillage du vin (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018). De la même façon, les producteurs de contenants en plastique réussissent à proposer des produits à prix nettement plus faibles que les verriers. Ceci peut être expliqué par le caractère incassable du plastique à température ambiante. En effet, les contenants en verre doivent être plus épais que ceux faits de plastique pour pallier l'aspect fragile du verre. En fait, pour l'emballage de breuvages, les contenants en plastique et en verre ont des poids moyens respectifs de 1,45 g et 18,92 g de matériel par once de contenu (The Aluminium Association, 2018). Cette réduction de poids et de matière nécessaire pour la production d'une bouteille est à l'avantage du plastique. Enfin, la T_f du polytéréphtalate d'éthylène (PET), le plastique le plus utilisé dans la fabrication de bouteilles de plastique, est de 255 °C (Thomas, 2012). L'énergie nécessaire pour fondre et mouler ce matériel est donc plus faible que celle nécessaire pour travailler le verre à une température de 1 565 °C (Owens-Illinois, 2018a). De ce fait, le coût énergétique de la fabrication de bouteille à partir du plastique est inférieur à celui d'une bouteille de verre.

Pour se démarquer en tant que fournisseur d'emballages, Owens-Illinois doit donc assurer l'amélioration continue de ses usines et de ses procédés de fabrication. Grâce à ces améliorations, le verrier espère diminuer ses coûts de production. Pour ce faire, certains enjeux doivent être considérés et gérés :

l'émission de gaz à effet de serre (GES), l'accès au verre récupéré comme matière secondaire et le taux de contamination et la nature des contaminants dans le verre récupéré. Les sections qui suivent sont consacrées à ces différents enjeux.

Émissions de gaz à effet de serre

D'abord, l'émission de GES lors de la fabrication du verre est une problématique environnementale et économique pour Owens-Illinois. Les GES générés proviennent principalement, sans considérer le transport des matières premières et des produits finis, de deux sources : le chauffage de la matière et la calcination de carbonates.

Premièrement, la fusion des matières premières et secondaires se fait dans des chaudières chauffées à plus de 1 560 °C. Cette température élevée est atteinte grâce à la combustion de gaz naturel, un combustible libérant 1 888 g d'équivalent de dioxyde de carbone (CO₂) par m³ de gaz brûlé (Environnement Canada, 2015).

La deuxième source importante de GES provient de la combustion des matières premières. Selon François Carrier, la recette approximative du verre fabriqué chez Owens-Illinois va comme suit : 80 % de sable, 10 % de carbonate de calcium (CaCO₃) et 10 % de carbonate de sodium (Na₂CO₃). (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018)

La calcination du CaCO₃ et du Na₂CO₃ permet la formation de deux composantes du verre, soit, respectivement, l'oxyde de calcium (CaO, ou chaux vive) et l'oxyde de sodium (Na₂O) (Asahi India Glass Limited, 2017). Or, ces réactions produisent du CO₂. Les équations et la stœchiométrie de ces réactions sont présentées dans les tableaux 1.2 et 1.3. Ces tableaux démontrent que pour chaque molécule de carbonate (CaCO₃ et Na₂CO₃) utilisée comme matière première, une molécule de CO₂ est libérée. En considérant que le sable utilisé dans le procédé de la verrerie est composé entièrement de SiO₂, le tableau 1.4 démontre que 1 000 kg de matières premières formeraient 914 kg de verre et 86 kg de CO₂. Pour une production de 450 tonnes de verre par jour, à l'instar de la capacité de l'usine montréalaise d'Owens-Illinois, l'utilisation exclusive de matières premières dans le procédé générerait annuellement plus de 15 000 tonnes de CO₂ dû à la décomposition thermique des carbonates. Considérant que cette usine est soumise au système québécois de plafonnement et d'échange de droits d'émission (SPEDE), cette quantité de GES peut représenter des droits d'émission devant être achetés par l'entreprise. Or, le prix minimal d'une unité d'émission de GES (une tonne d'équivalent CO₂) vendue aux enchères est fixé à

14,35 \$ en 2018 au Québec. Ainsi, 15 000 tonnes de CO₂ sont équivalent, selon ce minimum, à une somme annuelle de 215 000 \$ de droits d'émissions. En évitant l'émission de ces 15 000 tonnes de CO₂ par l'utilisation de calcin, l'entreprise peut donc souhaiter éviter un minimum de 215 000 \$ de dépenses annuellement.

Tableau 1.2 Stœchiométrie de la décomposition thermique par calcination du carbonate de calcium (compilation d'après Cotton, Wilkinson et Gaus, 1995, p. 312 ; MilliPORE SiGMA, 2018a ; 2018 b et 2018c)

Équation	$\text{CaCO}_3 \text{ (s)} \xrightarrow{\text{chaleur } (\Delta)} \text{CaO (l)} + \text{CO}_2 \text{ (g)}$		
Proportions (équivalent)	1	1	1
Masses molaires (g/mol)	100,09	56,08	44,01

Tableau 1.3 Stœchiométrie de la décomposition thermique du carbonate de sodium (compilation d'après MilliPORE SiGMA, 2018c ; 2018e et 2018f)

Équation	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ (s)} \xrightarrow{\Delta} \text{Na}_2\text{O (l)} + \text{CO}_2 \text{ (g)}$		
Proportions (équivalent)	1	1	1
Masses molaires (g/mol)	105,99	61,98	44,01

Tableau 1.4 Stœchiométrie de la production de verre par fusion d'une tonne de matières premières, suivi d'une vitrification par refroidissement rapide (compilation d'après Cotton, Wilkinson et Gaus, 1995, p. 312 ; MilliPORE SiGMA, 2018a ; 2018 b ; 2018c ; 2018d ; 2018e et 2018f)

Équation	Réactifs			Produits intermédiaires				Produit
	$\text{SiO}_2 \text{ (s)}$ (sable)	$\text{CaCO}_3 \text{ (s)}$	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \text{ (s)}$	$\xrightarrow{\Delta}$	$\text{SiO}_2 \text{ (l)}$	CaO (l)	$\text{Na}_2\text{O (l)}$	$\xrightarrow{\downarrow T^\circ}$ Verre (s)
Masses molaires (g/mol)	60,08	100,09	105,99		60,08	56,08	61,98	S.O.
Masse (kg)	800	100	100		800	56	58	914

Les deux problématiques d'émission de GES décrite précédemment peuvent être palliées par l'utilisation de calcin, c'est-à-dire de verre broyé. Cette matière secondaire remplace les matières premières dans le procédé de fabrication du verre. D'abord, la T_f du verre récupéré est inférieure à celle d'un mélange de matières premières. En effet, le verre se caractérise par une structure amorphe dans laquelle les liaisons chimiques entre molécules sont plus faibles que celles présentes, par exemple, dans les cristaux de SiO₂. La température nécessaire pour détruire ces liaisons et permettre la fusion du verre est donc inférieure à

celle des matières premières cristallines. De ce fait, la quantité de gaz naturel nécessaire pour le procédé est diminuée, menant directement à une baisse d'émission de GES. En moyenne, la consommation énergétique est réduite de 2,5 % par tranche de 10 % de calcin intégrée au mélange fondu pour la fabrication du verre (Joint Research Centre, 2013). Selon la Fédération Professionnelle des Entreprises du Recyclage (FEDEREC, 2017), ce seraient 787 MJ de gaz naturel qui seraient évités pour chaque tonne de calcin utilisé en remplacement de matières premières.

Enfin, le verre récupéré ne contient aucun carbonate et, lorsqu'il est chauffé et recyclé sous forme de nouveau verre, il ne génère aucun CO₂ comme le feraient des matières premières. Le tableau 1.5 démontre l'absence de génération de CO₂, au contraire du procédé présenté au tableau 1.4. Pour l'entreprise Owens-Illinois Montréal, le remplacement de 10 % de matières premières par de la matière secondaire, soit du verre récupéré, représente une baisse annuelle de 1 500 tonnes de GES provenant de la décomposition thermique des carbonates.

Tableau 1.5 Procédé de fabrication de verre à partir de verre recyclé

Équation	Verre recyclé (s) $\xrightarrow{\Delta}$	Verre (l) + $\uparrow 0 \text{ CO}_2 \text{ (g)}$	$\xrightarrow{\downarrow T^\circ}$	Verre (s)
Masse (kg)	1000	1000	0	1000

Accès au verre récupéré

Pour les raisons évoquées dans la section précédente, Owens-Illinois est intéressé à acheter un maximum de verre récupéré. De cette façon, l'entreprise souhaite utiliser 100 % de matière secondaire dans ses procédés.

Cependant, à l'heure actuelle, la quantité de verre récupéré de bonne qualité au Québec est inférieure à la demande. Le système de consigne publique est l'un des rares gisements de résidus de verre de bonne qualité et c'est ainsi que l'entreprise 2M Ressources fournit en partie l'usine de verre montréalaise. La majorité du verre issu de la collecte sélective, pour sa part, est trop contaminé pour être utilisé dans un procédé de production de verre. Loin de réussir à combler ses besoins par l'offre québécoise, Owens-Illinois Montréal doit également s'approvisionner en verre récupéré en Ontario et au Nouveau-Brunswick où les gouvernements gèrent la consigne de toutes les boissons alcoolisées, incluant les bouteilles de vin et spiritueux. Ces systèmes, qui seront décrits dans la section 3.2.3, permettent l'accès à une quantité non négligeable de verre récupéré de bonne qualité. Toutefois, la matière ontarienne fait face à la demande, entre autres, de l'usine d'Owens-Illinois de Brampton, Ontario. Au total, le verrier de Montréal a acheté, en 2016, 80 000 tonnes de verre récupéré. (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018)

D'un point de vue économique, l'achat de verre récupéré comme matière secondaire est équivalent à l'achat de matières premières. En effet, selon François Carrier (21 février 2018), Owens-Illinois achète les deux types de matières à un prix équivalent, soit environ 100 \$/tonne. Cependant, l'utilisation de verre récupéré a un impact positif sur la réduction d'émission de GES et sur la réduction de la consommation de gaz naturel. Pour ces raisons et pour des raisons environnementales, l'accès au verre récupéré est donc un enjeu principal chez Owen-Illinois. (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018)

Contamination du verre récupéré

Le verre récupéré est abondant au Québec. Cependant, la qualité de la majorité de cette matière est inférieure aux besoins du verrier Owens-Illinois. En effet, le verre récupéré proposé par les centres de tri québécois est contaminé par le papier, le carton, les plastiques, les métaux et les céramiques. Selon François Carrier (21 février 2018), la présence de papiers, de cartons et de plastiques en faible quantité (< 1 500 ppm) peut être tolérée. En effet, leur combustion produit du carbone responsable de la couleur ambrée du verre utilisé pour la production, entre autres, des bouteilles de bière de la consigne privée. Pour ce qui est des métaux, la majorité peut être facilement retirée de la matière secondaire grâce aux séparateurs magnétiques et ceux à courants de Foucault. Toutefois, la contamination par les céramiques est le principal problème du verre récupéré. Les T_f de ces matériaux sont supérieures à la température du procédé de fusion d'Owens-Illinois (Étienne et al., 2008). La présence de céramique peut donc mener à l'introduction de contaminants solides dans le mélange. Ces derniers peuvent alors produire des défauts et des faiblesses dans le produit final. Pour cette raison, le verre récupéré utilisé doit contenir moins de 50 ppm de céramiques. (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018)

2. LES MÉTHODES DE GESTION DES RÉSIDUS DE VERRE

Au Québec, la grande majorité des matières résiduelles ont été, jusqu'aux années 1970, systématiquement envoyées aux lieux d'élimination (Association des brasseurs du Québec [ABQ], 2018 ; Chamard et Méthot, s. d.). Toutefois, au cours des dernières décennies, les avantages environnementaux, sociaux et économiques du recyclage et des autres formes de valorisation ont petit à petit été reconnus par les Québécois et leur gouvernement. Différentes méthodes de GMR ont donc été développées depuis.

La présente section décrit les différentes méthodes possibles de gestion des résidus de verre. Ainsi, les points positifs et négatifs de l'élimination, du recyclage, de la valorisation et du réemploi seront relevés. Il est considéré, au cours des sous-sections qui suivent, que le verre valorisé est en grande majorité de type sodocalcique. En effet, les autres verres, tels que le verre plat ou le pyrex, sont moins facilement recyclables. De plus, ils représentent une faible fraction de l'ensemble des résidus de verre générés.

2.1 Élimination

Selon la *Loi sur la qualité de l'environnement* (LQE), l'élimination se rapporte à « [...] toute opération visant le dépôt ou le rejet définitif de matières résiduelles dans l'environnement [...] » (*Loi sur la qualité de l'environnement*). L'élimination comprend notamment l'incinération et la mise en décharge dans un lieu d'enfouissement technique (LET), un lieu d'enfouissement de débris de construction et démolition (LEDCE) ou dans un lieu d'enfouissement en tranchées (LEET) (RECYC-QUÉBEC, 2017a).

Malgré qu'il soit prévu de traiter les matières résiduelles selon l'ordre des 3RV-E (réduction à la source, réemploi, recyclage, valorisation, élimination) selon l'article 53.4.1 de la LQE (*Loi sur la qualité de l'environnement*), l'élimination était le mode de traitement le plus utilisé au Québec en 2015. Au cours de cette année, plus de 5,6 millions de tonnes de déchets avaient été éliminées, alors qu'un million de tonnes de matières avaient été envoyées aux centres de tri et que 1,1 million de matières organiques avaient été recyclées (RECYC-QUÉBEC, 2017a). Or, l'élimination présente plusieurs enjeux économiques, environnementaux et sociaux.

2.1.1 Enjeux environnementaux

La majorité des matières éliminées, soit près de 5,1 millions de tonnes, était enfouie au Québec en 2015 (RECYC-QUÉBEC, 2017a). Malgré les efforts pour les limiter, certaines problématiques environnementales découlent de l'enfouissement, notamment : la génération de GES, la lixiviation, la présence et la migration de toxines, l'acidification des sols et la condamnation de terrains et d'espaces naturels.

Génération de gaz à effet de serre

Au Canada, l'enfouissement est l'une des principales sources anthropiques de méthane relâché dans l'atmosphère (Gouvernement du Canada, 2014). Au Québec, en 2013, l'enfouissement des déchets était responsable de l'émission de 5,43 mégatonnes (MT) d'équivalents CO₂, soit 6,7 % de toutes les émissions québécoises de GES (Direction des politiques de la qualité de l'atmosphère, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MDDELCC], 2015). Ces émissions sont dues à la raréfaction graduelle de l'oxygène dans les lieux d'enfouissement, ce qui favorise, moins d'un an après l'enfouissement de la matière organique, sa digestion anaérobie (United States Environmental Protection Agency [EPA], 2017). La digestion anaérobie est le processus de décomposition naturel de la matière organique en absence d'oxygène par des bactéries spécialisées, produisant du méthane. Malgré les efforts pour capter et brûler les biogaz produits dans les lieux d'enfouissement, 74 % des 27 MT d'équivalents CO₂ générés par les sites d'enfouissement canadiens sont émis dans l'atmosphère (Gouvernement du Canada, 2014). Toutefois, la problématique de la génération de méthane dans les lieux d'enfouissement n'est pas dépendante du volume de verre éliminé. En effet, le méthane est produit lors de la décomposition de la matière organique. Le verre étant complètement de source inorganique, sa décomposition ne libère aucun GES.

Transport

La génération de GES liée à l'enfouissement peut également provenir d'autres sources, telles que le transport. En effet, dû à la faible acceptabilité sociale et à la grande superficie nécessaire pour l'enfouissement des déchets, les lieux d'enfouissement sont généralement éloignés des territoires densément peuplés (CMAP, 2018). Par exemple, dans le cas de Montréal, la majorité des ordures qui y sont produites est enfouie à l'extérieur du territoire montréalais, soit à Sainte-Sophie, à Terrebonne ou à Saint-Thomas (Conseil régional de l'environnement de Montréal, 2012a). En comparaison, le centre de récupération et de tri montréalais, opéré par le Groupe TIRU, est situé dans l'arrondissement de Saint-Michel, sur l'Île-de-Montréal (Ville de Montréal, s. d.). La distance supplémentaire devant être parcourue par les ordures pour être enfouie représente donc de la combustion de carburant supplémentaire. Ainsi, les 80 000 camions qui sortent annuellement les ordures de l'île de Montréal génèrent davantage de GES que ceux qui se dirigent vers le centre de tri situé à Saint-Michel (Dionne, Simard et Drapeau, 2006). Dans le cas du verre, cette différence de génération de GES est applicable et peut être considérée lors de l'étude des différentes méthodes de gestion des résidus de verre.

Lixiviation et contamination des sols et eaux adjacents

Les lieux d'enfouissement produisent également un liquide provenant notamment de la pluie, de la neige ou de matières humides comme les matières organiques. Ce liquide percole au travers des résidus enfouis et peut entraîner différents produits plus ou moins toxiques tels que des métaux lourds, des hydrocarbures, des particules de plastique, etc. (Environment Victoria, 2013) Ultimement, le lixiviat qui en résulte peut contaminer les sols sous et autour du site. Le liquide peut se charger d'espèces acides produites lors de la décomposition organique (Waste-to-Energy Research and Technology Council [WtERT], 2009). Le lixiviat acide peut alors, en percolant au travers de diverses matières, dissoudre des métaux lourds. Ces derniers peuvent ensuite être entraînés dans les sols et cours d'eau et ainsi les contaminer. (RECYC-QUÉBEC, 2010b). Comme dans le cas de la génération de méthane, la présence de verre dans un lieu d'enfouissement n'a pas d'impact notable sur la lixiviation. D'abord, le verre ne contient pas d'eau et ne produit donc pas de liquide. Ensuite, le verre est l'une des matières qui se dégradent le plus lentement. Avec un temps de décomposition dans l'environnement approximé à plusieurs milliers d'années, la présence de composantes de verre dans le lixiviat d'un centre d'enfouissement est limitée (Récup Estrie, 2018 ; State of New Hampshire, 2017). Le verre résiste également bien aux milieux acides et à la corrosion, ce qui le rend stable face au lixiviat acide des sites d'enfouissement (Glass Alliance Europe, 2015). De plus, excepté les traces d'oxydes métalliques utilisés pour la coloration des verres verts (chrome, fer) et bleus (cobalt, cuivre, fer), le verre ne contient pas de métaux lourds pouvant contaminer les sols et les cours d'eau (Étienne et al., 2008 ; F. Carrier, entrevue, 21 février 2018). Enfin, le verre ne contient aucune matière organique et n'est donc pas responsable de l'acidification des eaux de lixiviation. Pour ces raisons, le problème de lixiviation dans les lieux d'enfouissement est indépendant de la quantité de verre enfouie.

Condamnation de terrains

Les sites d'élimination sont de moins en moins nombreux au Québec. En obligeant les sites à répondre à de nouvelles exigences, le Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles (REIMR) s'est traduit par la nécessité de faire d'importants investissements technologiques. Ces dépenses ayant un impact sur la rentabilité des sites, 83 % d'entre eux ont fermé entre les années 2000 et 2012, passant de 452 sites en fonction à 77 (RECYC-QUÉBEC, 2014a). De ce fait, les lieux d'enfouissement en activité sont davantage sollicités et se remplissent plus rapidement. Lorsqu'ils arriveront aux maximums de leurs capacités, il sera nécessaire d'ouvrir de nouveaux sites, condamnant ainsi des terrains qui auraient pu, autrement, servir de milieu naturel, de terres agricoles, de terrains résidentiels, etc. De plus, les normes

de localisation des lieux d'enfouissement établie par le REIMR et la résistance des habitants et des municipalités face à l'implantation potentielle d'un tel site sur leur territoire peuvent mener à l'éloignement des futurs lieux d'enfouissement. Cet éloignement est alors synonyme d'émission de GES et de hausse des coûts de transport. Afin d'éviter de devoir condamner des terrains pour l'aménagement de nouveaux lieux d'enfouissement, il est primordial de limiter la quantité de matières résiduelles envoyées à l'élimination, notamment les résidus de verre.

2.1.2 Enjeux sociaux

Pour des raisons économiques et de qualité de vie, les lieux d'élimination peuvent soulever l'opposition publique. Par exemple, le LET de Lachenaie exploité par BFI a provoqué le soulèvement de certains citoyens en lien avec son projet d'agrandissement. La population décriait alors l'injustice de devoir recevoir, dans leur municipalité, les déchets d'autres municipalités tels que ceux de Montréal. Les habitants craignaient une baisse de la qualité de vie et de la valeur foncière découlant des émissions et les odeurs dégagées par le site. (Ambioterra, 2008 ; André Simard et associés, 2006) D'ailleurs, entre 2003 et 2007, 922 plaintes ont été formulées concernant les odeurs et la présence de goélands et de leurs excréments dues aux activités du LET (BFI Canada, s. d. ; Bourdages, 2007). De la même façon, l'exploitation et les projets d'agrandissement des LET de Sainte-Sophie, de Saint-Thomas et d'Argenteuil Deux-Montagnes ont inquiété les populations au sujet des odeurs, des bruits, de la présence de goélands et de la qualité des eaux souterraines et de surfaces (André Simard et associés, 2006).

Bien que le verre soit inerte et qu'il ne produise pas de problème d'odeur, de qualité de l'eau ou de présence de goélands, son enfouissement peut accélérer le remplissage des lieux d'élimination et forcer l'ouverture d'autres sites. Ces processus peuvent alors soulever les inquiétudes des populations vivant à proximité des sites prévus.

2.1.3 Enjeux économiques

L'élimination des matières résiduelles entraîne des coûts pour les municipalités et les entreprises. Premièrement, les frais d'exploitation et les investissements liés aux lieux d'élimination sont couverts par leurs clients, dont les ICI, le secteur des CRD, les municipalités et, par extension, les habitants de ces dernières. Ces frais peuvent entre autres être liés à la main-d'œuvre, à la machinerie, à la gestion des eaux de lixiviation, à l'administration et aux terrains. Au contraire des centres de tri, des conditionneurs et des autres maillons de l'industrie du recyclage, les sites d'élimination n'ont pas de matière à vendre pour

amortir ces frais en les incluant dans les prix de vente. Ils peuvent toutefois récupérer du méthane issu de la digestion anaérobie des matières organiques et le vendre sous forme de biogaz.

Deuxièmement, les exploitants de lieux d'élimination doivent payer une redevance au gouvernement provincial. Celle-ci sert principalement à subventionner les plans de gestion des matières résiduelles (PGMR) des municipalités et leur mise en œuvre, ainsi qu'à financer le Programme de traitement des matières organiques par biométhanisation et compostage (PTMOBC) du Québec. Selon le Gouvernement du Québec (2018), les redevances existent également pour « [...] réduire les quantités de matières résiduelles qui sont éliminées et [...] augmenter la durée de vie des lieux d'élimination. » En 2018, les redevances atteignent un total de 22,57 \$ par tonne de déchets éliminés et résultent d'une augmentation de 226 % depuis 2006 (Gouvernement du Québec, 2018b). Ces frais sont payés par les exploitants des lieux d'élimination et affectent donc directement le prix payé par leurs clients. Avec environ 135 000 tonnes de résidus de verre envoyé à l'élimination par le secteur résidentiel en 2015 (RECYC-QUÉBEC, 2017a), les redevances pour cette matière et ce secteur s'élèveraient, en 2018, à plus de 3 000 000 \$.

2.1.4 Autres enjeux

À l'intersection des enjeux économiques, environnementaux et sociaux se trouve l'une des problématiques principales de l'élimination : le rejet de matières secondaires potentielles. Une matière secondaire est, selon RECYC-QUÉBEC (2017b), un « [r]ésidu récupéré, conditionné ou non, qui peut être utilisé dans un ouvrage ou un procédé de fabrication. » Cette matière, si elle est éliminée, ne pourra pas être utilisée comme substitut à une matière première dans un produit ou dans une construction. Ce rejet entraîne donc la nécessité de produire ou d'extraire des matières premières. En découlent une pression accrue sur les ressources et sur l'environnement ainsi qu'une hausse des prix des matériaux (Chicago Metropolitan Agency for Planning [CMAP], 2018). Ces problématiques sont le propre de l'économie linéaire. Considérant que plusieurs ressources ne sont pas en quantités infinies, un tel modèle économique basé sur l'extraction perpétuelle de ressources n'est pas viable. Il est donc primordial de remplacer ce système linéaire par une économie circulaire où l'élimination est limitée à son strict minimum, et ce, en favorisant la réduction à la source, le réemploi et le recyclage.

2.2 Recyclage et autres techniques de valorisation

La valorisation englobe l'ensemble des techniques permettant de détourner la matière de l'élimination. L'une de ces techniques, le recyclage, se définit comme l'utilisation « [...] d'une matière récupérée en remplacement d'une matière vierge. » (RECYC-QUÉBEC, 2017c). Comme le montrent les chapitres 4 et 5,

les résidus de verre récupérés peuvent être utilisés dans plusieurs procédés en remplacement de diverses matières premières. Le recyclage et la valorisation du verre pallient certaines problématiques de l'élimination et à d'autres enjeux liés à l'industrialisation. Au niveau environnemental, la valorisation du verre permet entre autres de diminuer la pression sur les ressources, diminuer la vitesse de remplissage des lieux d'enfouissement, diminuer la génération de GES dans l'industrie du verre et de diminuer le transport associé aux déchets et aux ressources. D'un point de vue économique, l'utilisation de matières secondaires est bénéfique pour les différentes industries qui valorisent le verre recyclé en remplacement de matières premières. Le coût de gestion de la filière de la récupération est également inférieur au coût de l'élimination dû à la vente subséquente de matières à des recycleurs.

Toutefois, avant d'être recyclé ou valorisé au sein de ces procédés, le verre doit être récupéré. Pour ce faire, trois techniques sont utilisées au Québec : la collecte de porte à porte, la consigne publique et l'apport volontaire.

2.2.1 Collecte de porte à porte

La collecte de porte à porte consiste à faire la cueillette des résidus à chaque adresse, à une fréquence déterminée par la municipalité (RECYC-QUÉBEC, 2006). Dépendamment des réglementations, des politiques en place, de la capacité technologique des centres de tri et de l'engagement des citoyens, le tri à la source précédant la collecte de porte à porte peut être plus ou moins compartimenté. L'importance de ce tri peut avoir deux impacts opposés sur la performance finale du taux de recyclage. La séparation de plusieurs matières peut améliorer leur pureté et, donc, leur recyclabilité. Cependant, la collecte de plusieurs matières séparée peut être plus compliquée et onéreuse. Un tel tri peut également décourager le citoyen, abaissant la performance de la récupération et du recyclage global. (Mairie de Paris, 2018)

Actuellement, la collecte sélective au Québec est en transition entre un tri en deux matières, soient les matières recyclables et les déchets ultimes, vers un tri à trois matières où les résidus organiques sont isolés des déchets ultimes. À Paris, le tri se fait en trois compartiments : le verre creux, les autres matières recyclables non organiques, puis les déchets ultimes (Mairie de Paris, 2018).

Défis et désavantages

Cette méthode nécessite une logistique plus importante que l'apport volontaire dû à la nécessité de produire des routes de collecte pour desservir tous les citoyens. De plus, les dates de collectes prédéfinies ne reflètent pas nécessairement les besoins de la population. Le transport associé à la collecte n'est donc

pas optimal. Enfin, il est possible d'imaginer que les arrêts et départs fréquents des véhicules de collecte ont un impact important sur la consommation d'essence et sur leur entretien. Tout comme dans le cas de la collecte des déchets ultimes, cet impact est directement proportionnel à la fréquence de collecte. Ces raisons peuvent expliquer pourquoi, selon RECYC-QUÉBEC (2006) « [l]es programmes de collecte sélective de porte à porte sont [...] plus onéreux à mettre sur pied et à opérer que les systèmes de dépôt volontaire. »

Au contraire de la consigne, la collecte de porte à porte ne présente aucun avantage apparent pour le citoyen mal informé. Sa performance dépend donc du taux de sensibilisation des consommateurs. Pour en améliorer l'efficacité, les municipalités peuvent mettre en œuvre des campagnes de sensibilisation. Il leur est également possible d'encourager la récupération en décourageant l'élimination. Pour ce faire, une municipalité peut réduire le volume des contenants à déchets ultimes et diminuer la fréquence de collecte de ces derniers.

Avantages

La collecte de porte à porte est la méthode de récupération qui demande le moins d'effort de la part du citoyen. Celui-ci doit simplement déposer ses matières résiduelles dans un contenant personnel, habituellement un bac roulant, et disposer ce dernier au bord de la rue le jour de la collecte prévu par la municipalité. Pour cette raison, cette méthode de collecte est plus performante en termes de volume collecté que l'apport volontaire. C'est donc la raison pour laquelle la collecte de porte à porte est la méthode principale au Québec avec, déjà en 2006, plus de 85 % des citoyens desservis. (RECYC-QUÉBEC, 2006)

2.2.2 Consigne de contenants à remplissage unique

La consigne consiste en un dépôt que le consommateur remet à un détaillant lors de l'achat de contenants consignés. Ce dépôt lui est ensuite remis si et lorsqu'il rapporte le contenant à un détaillant. Cette méthode a pour but de stimuler le consommateur à rapporter ses contenants afin qu'ils soient récupérés, appliquant ainsi le principe de pollueur-payeur (Olivier, 2015).

Désavantages

La consigne des contenants en aluminium est à la source d'une baisse de revenus importants pour les centres de tri. Comme toute entreprise, la survie des centres de tri est en partie dépendante de leurs ventes. Or, avec une valeur moyenne de 1 292 \$/tonne en 2017, l'aluminium est « [...] une matière très

payante pour les centres de tri. » (Olivier, 2015 ; RECYC-QUÉBEC, 2018b). Le retrait de cette matière au profit de la consigne a donc un impact non négligeable sur leurs revenus. Toutefois, au niveau de la consigne sur les contenants de verre, ce désavantage ne s'applique pas. En effet, cette matière peut poser des problèmes de contamination des autres matières. Il peut donc être avantageux, pour les centres de tri, de retirer les contenants de verre de la collecte sélective. De plus, avec une valeur moyenne négative de - 27,81 \$/tonne en 2017, son prix de vente n'est pas intéressant pour les centres de tri (RECYC-QUÉBEC, 2018b).

En fonction de la matière, la consigne peut être plus ou moins intéressante en matière d'émissions de GES en comparaison avec la collecte sélective. Selon une « Étude comparative des systèmes de récupération des contenants de boisson au Québec » (Buist et al., 2015), la collecte sélective et la consigne ont un coefficient d'émission de GES inférieur à l'élimination. Cependant, comme il a été vu au tableau 2.1, la collecte sélective de l'aluminium émet moins de GES que la consigne. Au contraire, pour le plastique, c'est la consigne qui émet moins de GES. Enfin, pour le verre, les deux méthodes sont équivalentes. (Buist et al., 2015). Il est toutefois important de considérer le taux de recyclage du verre selon les différentes méthodes. En effet, les coefficients d'émission de GES tiennent compte « [d]es émissions de GES évitées par la récupération et la valorisation de matières au lieu d'utiliser de la matière vierge dans la fabrication des produits. » (Buist et al., 2015) Or, les données de cette étude datent de 2005, à un moment où le taux de recyclage du verre issu de la collecte sélective était plus élevé qu'à l'heure actuelle (RECYC-QUÉBEC, 2014a ; RECYC-QUÉBEC, 2017a). Ainsi, la consigne, avec ses taux de recyclage de verre relativement stables et élevés, pourrait présentement avoir un coefficient d'émission de GES plus faible que la collecte sélective avec son taux de recyclage faible.

Tableau 2.1 Coefficients d'émission de gaz à effet de serre pour les différentes matières provenant de la collecte sélective et de la consigne (inspiré de : Buist et al., 2015, p. 182)

		Verre	Plastique	Aluminium
Coefficient d'émission (tCO ₂ éq./tonne)	Collecte sélective	0,3	0,7	1,7
	Consigne	0,3	0,5	5,3

Au niveau économique, la consigne représente un investissement important pour les détaillants. Leur rôle au sein de la consigne inclut la réception des contenants retournés par les consommateurs. Pour ce faire, les détaillants doivent payer des employés, utiliser une surface de leur entrepôt pour entreposer les contenants, acheter et entretenir des gobeuses à lecteur optique, etc. Selon Buist et al. (2015), les frais liés à l'achat d'une gobeuse seraient de 5241 \$/année. Ces frais peuvent être couverts par la prime

d'encouragement de 0,02 \$/contenant que l'État paie aux détaillants (Olivier, 2015). C'est donc le gouvernement qui doit compenser ces coûts. Ces derniers sont toutefois absorbés par les consignes non réclamées (RECYC-QUÉBEC, 2009b). Ces arguments économiques peuvent cependant être relevés par différentes parties prenantes qui privilégient la collecte sélective.

En ce qui a trait au coût de cette méthode pour l'état, la consigne s'autofinance jusqu'à un certain seuil de performance. Au-delà de ce dernier, la consigne n'est plus autofinancée et nécessite des investissements. Cette performance critique est de « [...] 71,4 % pour la consigne de 5 ¢ [de] 83,3 % pour la consigne de 10 ¢ et [de] 90,9 % pour la consigne de 20 ¢ » (RECYC-QUÉBEC, 2009b). Dans les années 90, avant l'arrivée des consignes de 20 ¢ sur les contenants de plus de 450 mL, l'état a accusé des déficits budgétaires dus à une performance trop importante de la consigne (Olivier, 2015). Actuellement toutefois, la performance de la consigne publique est inférieure aux taux limites et elle est donc autofinancée.

Enfin, la consigne reste un système parallèle à la collecte sélective et aux centres de tri. Plusieurs produits du verre (produits alimentaires) ne sont pas consignés et les centres de tri doivent donc procéder au tri du verre indépendamment de l'existence ou non de la consignation de certains contenants. Il reste donc nécessaire d'améliorer le tri du verre du reste des matières recyclables dans les centres de tri.

Avantages

Les avantages de la consigne résident dans le taux de recyclage global des contenants. Dépendamment des matières, la performance de la récupération par consigne et la pureté des matières issues de cette méthode peuvent être supérieures à la collecte sélective (Pro-consigne Québec, 2014).

D'abord, la consigne a un taux de récupération global supérieur à la collecte sélective. Une étude de caractérisation montre que, en 2010, la collecte sélective permettait de récupérer 65 % des matières recyclables du secteur résidentiel (RECYC-QUÉBEC, 2013). La consigne publique, pour sa part, permettait un taux de récupération de 72 % en 2010, et de 71 % en 2015, toutes matières confondues. Il est à noter, toutefois, que le type de matière a un impact important sur le taux de récupération. Par exemple, en 2010, 82 % du verre, excluant les contenants retournés à la consigne, était récupéré grâce à la collecte sélective (RECYC-QUÉBEC, 2013). De son côté, la consigne publique obtient des taux de récupération du verre inférieurs, soit de l'ordre de 71 à 77 %, en 2015 et 2012 respectivement (RECYC-QUÉBEC, 2017a).

Malgré des taux de récupérations du verre inférieur pour la consigne des contenants à remplissage unique (CRU), la pureté de la matière qui en est issue est supérieure à ce que peuvent fournir la collecte sélective

et les centres de tri. À preuve, la grande majorité du calcin utilisé dans les procédés de fabrication de l'usine de fabrication de verre montréalaise Owens-Illinois provient de la consigne publique, faute de verre récupéré de qualité en provenance des centres de tri (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018). En fait, virtuellement 100 % de la matière récupérée par la consigne peut être recyclée (Pro-consigne Québec, 2014). Ainsi, alors que 71 % des CRU de verre étaient récupérés par la consigne en 2015 (RECYC-QUÉBEC, 2017a), il est possible de croire que la quasi-totalité de ceux-ci a été recyclée et donc que le taux de recyclage global des CRU consignés de verre a également dû s'approcher de 71 %. Cette année-là, c'est 14 % du verre récupéré par la collecte sélective qui a été acheminé à des fins de recyclage (RECYC-QUÉBEC, 2017a). Même avec une performance de récupération de 100 %, le taux de recyclage global de la collecte sélective ne pouvait donc pas dépasser 14 %. Pour conclure, en plus d'assurer une meilleure pureté du verre récupéré, la consignation du verre permet de diminuer la quantité de verre dans les centres de tri, réduisant du même coup la contamination des autres matières par le verre. (Conseil régional de l'environnement de Montréal, 2012b)

Au niveau environnemental, il a été énoncé précédemment que la consigne a un coefficient d'émission de GES au moins égal à la collecte sélective pour le verre. On pourrait croire que le transport des contenants consignés par les consommateurs pourrait être une source importante de GES au sein de cette méthode. Toutefois, seuls les transports dédiés uniquement au retour des contenants sont considérés pour le calcul des émissions, soit 15 % d'entre eux (Buist et al., 2015). Dans le reste des cas, les déplacements sont mutualisés aux transports liés à d'autres achats. L'ACV ne considère les déplacements qu'une seule fois pour des activités multiples. Dans ce cas, le transport est considéré dans la phase d'achat ou de consommation, et non pas dans la fin de vie.

Les autres avantages de la consigne concernent notamment l'autofinancement des efforts d'information, de sensibilisation et d'éducation (ISE) de la population et des ICI grâce aux contributions perçues sur chaque consigne. Ces contributions obligatoires sont de l'ordre de 0,0625 ¢/CRU, ce qui représente 1,25 million de dollars par milliard de CRU commercialisés. (RECYC-QUÉBEC, 2017d)

Ensuite, l'incitatif monétaire permet à des individus ou des organismes de ramasser des contenants consignés préalablement jetés aux poubelles ou dans l'environnement. Cet aspect aide donc à la lutte aux déchets sauvages et augmente les taux de récupération.

Enfin, la consigne et la documentation qui en découle permettent également de faire un suivi précis sur la commercialisation, la consommation, la récupération et le recyclage des contenants. Ce suivi permet de comprendre les flux de matières et d'ainsi planifier la GMR.

2.2.3 Apport ou dépôt volontaire

Cette méthode de récupération, plus marginale que la collecte pêle-mêle ou la consigne publique au Québec, consiste à installer des cloches ou des conteneurs publics et à les rendre disponibles pour la récupération. Les citoyens sont alors libres d'aller y déposer leurs matières résiduelles. Les conteneurs ou le contenu des cloches sont ensuite collectés par l'entreprise mandatée à une fréquence donnée ou lorsqu'ils sont pleins. Comme dans le cas de la collecte au porte-à-porte, le dépôt volontaire peut favoriser le tri des matières par contenant, ou la collecte pêle-mêle. Cette pratique se différencie de la consigne principalement par l'absence de dépôt monétaire.

L'un des exemples les plus évidents de cette méthode dans la GMR au Québec est le concept d'écocentre. Un écocentre est un « [l]ieu public aménagé pour le dépôt de matières recyclables, de résidus [...] et d'objets récupérables, dans le but d'en encourager le réemploi et le recyclage. » (RECYC-QUÉBEC, 2017c). Il consiste en un terrain public où sont stationnés divers conteneurs dans lesquels sont jetées des matières prédéfinies, partiellement ou totalement triées. Les écocentres nécessitent toutefois l'achat et l'aménagement d'un terrain et ils sont donc dispersés à des endroits stratégiques sur le territoire québécois. Comme autres exemples du dépôt volontaire peuvent être cités les différents réseaux de don de vêtements usagés installés dans certaines villes du Québec. Des organismes tels que Certex, Ekotex, Entraide Diabétique du Québec et Récupex proposent des boîtes de don dans des endroits publics et privés où les citoyens peuvent déposer leurs vêtements et autres tissus afin qu'ils soient redistribués ou recyclés, par exemple, sous forme de chiffons. (Certex, 2018 ; Ekotex, 2015 ; Entraide Diabétique du Québec, 2018 ; Récupex, 2014)

Comme vu à la section 3.4, cette pratique appliquée à la récupération du verre n'est implantée que dans de rares municipalités au Québec. De ce fait, il est difficile d'en connaître les avantages et les désavantages. Cependant, cette méthode est répandue en France et couvre 80 % de la collecte des résidus de verre (Bio Intelligence Service, AJI-Europe et BP2R, 2012).

Défis et désavantages

Selon l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), l'apport volontaire aurait actuellement une performance inférieure à la collecte de porte à porte due, notamment, à la concurrence entre les flux et les différentes méthodes de GMR (ADEME, 2014). En effet, s'ils doivent participer à plusieurs méthodes de GMR (collecte de certaines matières récupérables de porte à porte et d'autres matières récupérables en dépôt volontaire), les citoyens peuvent avoir tendance à abandonner la pratique demandant le plus d'effort. En considérant que les matières doivent être déplacées jusqu'à un point de dépôt pour l'apport volontaire, cette pratique demande plus d'effort que le porte à porte (RECYC-QUÉBEC, 2006). Cette réalité est plus évidente si une seule matière est couverte par l'apport volontaire (ADEME, 2014). Ainsi, l'effort supplémentaire à déployer pour récupérer une seule matière est plus décourageant que si plusieurs flux étaient récupérables en apport volontaire.

Toutefois, l'écart de performance entre l'apport volontaire et le porte à porte pourrait être diminué en améliorant l'accessibilité et la densité des points d'apport volontaire. Selon l'ADEME, une amélioration du service pourrait limiter à 15 % l'écart de performance entre l'apport volontaire et la collecte de porte à porte. (ADEME, 2014)

Avantages

L'apport volontaire retient l'intérêt de la France par son avantage économique. Par exemple, la collecte du verre, en considérant qu'il soit trié des autres matières dans les deux cas, serait de trois à quatre fois plus dispendieuse de porte à porte que par apport volontaire. Ceci est expliqué par la fréquence de collecte de porte à porte plus importante que celle par apport volontaire où les conteneurs sont remplacés lorsqu'ils sont pleins. (ADEME, 2014)

L'intérêt principal de cette méthode de GMR pour les résidus de verre consiste à trier à la source le verre des autres matières. Ce faisant, la contamination des autres matières recyclables par le verre, et vice versa, est moins importante. En réponse à la haute contamination des résidus de verre au Québec, cette méthode peut donc être considérée comme alternative au tri.

Il est intéressant de noter que dépendamment du lieu de dépôt volontaire, les GES émis lors des déplacements peuvent être mutualisés avec d'autres activités. Par exemple, un point de dépôt volontaire situé à proximité d'un lieu qui fait la vente d'alcool mutualiserait l'achat de bouteille et le retour de bouteilles vides, à l'instar de la consigne (Bio Intelligence Service et LET – Lyon 2, 2014). Dans un tel cas,

les GES émis pour le dépôt volontaire ne seraient donc pas comptabilisés dans le cycle de vie de la bouteille.

2.3 Réemploi

Le réemploi répond à la seconde priorité du principe des 3RV-E. Il est défini par RECYC-QUÉBEC (2017c) comme « [...] l'utilisation répétée d'un produit ou d'un emballage, sans modification de son apparence ou de ses propriétés. » Au Québec, le concept de réemploi du verre est principalement exploité au travers du système de consigne privée des contenants à remplissage multiple (CRM). Cette pratique est gérée par l'industrie brassicole (ABQ, 2018).

La différence principale entre les systèmes de consigne publique et privée réside dans la gestion des contenants récupérés. Dans le premier cas, la consigne touche des CRU qui, une fois récupérés, sont renvoyés dans de nouveaux procédés industriels où ils sont recyclés. Dans le second cas, la consigne touche des CRM qui, lorsque récupérés, sont recyclés ou lavés puis réutilisés par les brasseurs et embouteilleurs. Au sens de la loi et de l'Entente portant sur la consignation, la récupération et le recyclage des CRU de bière, un CRM n'est pas consigné, mais il doit pouvoir « [...] être réutilisé un minimum de 10 fois aux mêmes fins pour lesquelles il avait été conçu à l'origine [...] » (RECYC-QUÉBEC, 2014b). Dans les faits, ces bouteilles peuvent être réutilisées jusqu'à une quinzaine de fois avant d'être recyclées (ABQ, s. d.).

Défis et désavantages

Puisqu'il s'agit d'un système de consignation, la consigne privée devrait partager les mêmes avantages et désavantages que la consigne publique. Cependant, puisqu'elle ne s'applique qu'à des contenants en verre et que le verre récupéré ne vaut pratiquement rien, elle ne fait pas souffrir les centres de tri.

La consigne privée ne mène à aucune dépense de la part des contribuables ou de l'état. Elle est gérée et financée par l'industrie et les coûts qui en découlent sont donc inclus dans les prix des produits vendus. Ce système peut toutefois engendrer des coûts pour les détaillants qui vendent de tels produits. Toutefois, au contraire de la consigne publique, les détaillants ne sont pas obligés de récupérer les contenants des marques qu'ils ne vendent pas. De ce fait, ils ont le choix de participer ou non à ce système en vendant ou non ces produits.

Avantages

Les avantages de la consigne privée sont les mêmes que ceux de la consigne publique vue à la section 2.2.2, notamment un taux de récupération plus élevé que la collecte sélective, une pureté de résidus de verre plus élevée que celle obtenue par les centres de tri, et un impact environnemental inférieur à la collecte sélective. Toutefois, les avantages sont plus importants encore que ceux de la consigne publique grâce, entre autres, au fait que les contenants sont réutilisés au minimum 10 fois.

Globalement, les CRM ont un taux de récupération de 95 %, ce qui en fait un système d'une performance inégalée au Québec (RECYC-QUÉBEC, 2009b). À la fin de leur vie utile, soit après plus de 10 réutilisations, les CRM sont directement envoyés aux recycleurs, produisant du calcin d'une grande pureté à l'instar des CRU (Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services [CIRAIG], 2010). De ce fait, le taux de détournement de l'élimination de cette méthode est très élevé.

Au niveau environnemental, la supériorité des CRM face aux CRU a été démontrée grâce à une ACV conduite par le CIRAIG pour le compte de RECYC-QUÉBEC. Comme le montrent les conclusions du rapport rapportées au tableau 2.2, l'impact des CRU de verre au Québec est quatre fois plus important que celui des CRM, et ce, en ce qui a trait aux changements climatiques (CC), aux ressources et à la santé humaine. Une mise à jour de cette étude effectuée en 2015 tient compte des statistiques plus récentes fournies par RECYC-QUÉBEC ainsi que des valeurs d'impact à jour des différents matériaux et procédés. L'annexe 2 montre les modifications effectuées entre les deux études publiées en 2010 et 2015. Le tableau 2.2 reprend les conclusions des deux rapports et compare les CRM aux CRU de verre. La mise à jour publiée en 2015 démontre des fourchettes d'impact plus importantes que l'étude de 2010, mais confirme l'avantage environnemental des CRM. Enfin, en ce qui a trait aux émissions de GES, la figure 2.1 illustre la performance supérieure des CRM comparativement aux CRU de verre, et ce, selon le rapport publié en 2015. (CIRAIG, 2010 et 2015)

Tableau 2.2 Amplitude des impacts environnementaux des contenants de bière (compilation d'après : CIRAIG, 2010, p. 3 ; CIRAIG, 2015, p. viii)

Contenant	Aspects environnementaux		
	Changements climatiques	Ressources	Santé humaine
CRM en verre	100 %	100 %	100 %
CRU en verre (2010)	350-380 %	370-400 %	470-480 %
CRU en verre (2015)	283-416 %	291-432 %	430-683 %

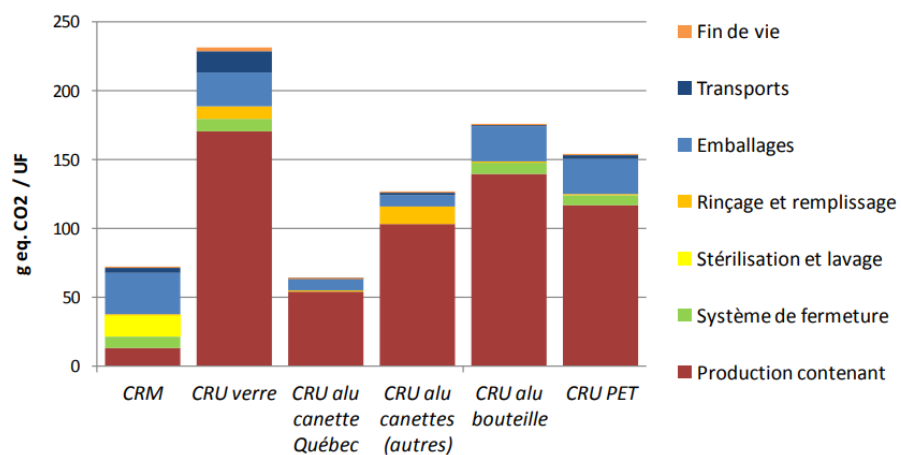


Figure 2.1 Émissions de gaz à effet de serre par étape du cycle de vie des contenants de bière selon l'étude mise à jour (tiré de CIRAIG, 2015, p. 53)

Comme vu à la section 2.2.2, le cycle de vie des CRU de verre consignés génère moins de GES que celui des contenants de verres récupérés par la collecte sélective. Ainsi, il peut maintenant être établi que le cycle de vie des CRM génère moins de GES que le verre récupéré par la collecte sélective.

3. EXEMPLES D'APPLICATION DES MÉTHODES DE GESTION DES RÉSIDUS DE VERRE AU QUÉBEC ET AILLEURS

Au fil des années, le Québec a développé différentes techniques de gestion des résidus de verre. Alors que certaines brasseries réutilisent leurs bouteilles depuis 1808, les autres contenants de verre ont été systématiquement jetés aux poubelles, comme le reste des autres matières résiduelles, jusqu'aux années 1970 (ABQ, 2018, Chamard et Méthot, s. d.). Au cours des dernières décennies, les avantages du recyclage du verre sont devenus de plus en plus évidents. De ce fait, des méthodes de gestion des résidus de verre ont vu le jour. Dans le but de recycler ce matériau, chacune de ces méthodes a pour objectif ultime de produire une matière hautement décontaminée.

Afin de comprendre l'évolution de la gestion des résidus de verre au Québec, la présente section s'intéresse d'abord aux différents objectifs gouvernementaux en termes de GMR. Les sous-sections suivantes décrivent l'application, aux résidus de verre, de la consigne, de la collecte sélective de porte à porte et de l'apport volontaire au Québec et ailleurs.

3.1 Normes et objectifs de récupération du verre au Québec

Dans le but de limiter la quantité de matières résiduelles envoyées à l'enfouissement, le gouvernement québécois a développé, au fil des années, différentes politiques de GMR. Les sous-sections qui suivent décrivent les points importants de ces documents, notamment en matière de gestion du verre.

3.1.1 Politique québécoise de gestion intégrée des déchets solides (1989)

La hiérarchisation des méthodes de gestion des déchets a fait son apparition dans les textes officiels québécois en 1989. En effet, c'est dans la politique québécoise de gestion intégrée des déchets solides de 1989 que le concept des 3RV-E est mentionné pour la première fois. Dès cet instant, le gouvernement québécois reconnaissait la nécessité d'une gestion intégrée des déchets afin de diminuer les impacts environnementaux, économiques et sociaux des matières résiduelles. Cette politique innovait alors en ouvrant la porte à différentes mesures de réduction de déchets ultimes qui n'étaient pas, jusqu'alors, encouragées. Sans définir clairement ces concepts, la politique alors adoptée spécifiait que l'ordre à respecter pour la gestion des déchets devait aller comme suit : « La réduction à la source, le réemploi, le recyclage, la valorisation et l'élimination [...] » (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs [MDDEP], 2010). Par cette politique, le Québec visait une réduction de 50 % des déchets éliminés, et ce, avant l'an 2000. (MDDEP, 2010 ; Olivier, 2015)

Les difficultés auxquelles ont fait face les différents acteurs de la GMR au cours des années suivantes ont mené à une incapacité d'atteindre la réduction visée. Pour répondre à ces difficultés, tenter de mieux cerner les besoins des acteurs en GMR et identifier les approches les plus susceptibles de permettre une gestion durable des déchets, le gouvernement a demandé au Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE) de lancer une commission et des audiences publiques sur le sujet. Cette commission a confirmé la nécessité de suivre la hiérarchie des 3RV-E. Elle a également recommandé l'approche pollueur-payeur, a proposé des rôles aux différents niveaux gouvernementaux, et a conseillé de viser une réduction d'élimination plus ambitieuse encore que celle de 50 % vue précédemment. (MDDEP, 2010 ; Olivier, 2015)

3.1.2 Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008

Suite au rapport du BAPE, la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008 est venue remplacer la politique précédente. Les principes énoncés dans cette politique sont semblables aux recommandations du BAPE, notamment de continuer à respecter le principe des 3RV-E à moins qu'une analyse environnementale démontre l'intérêt de ne pas le respecter. La responsabilité élargie des producteurs (REP), la participation citoyenne, la régionalisation et les partenariats sont les autres principes énoncés. L'objectif global de la politique est de « [...] mettre en valeur plus de 65 pour cent des [...] matières résiduelles pouvant être mises en valeur annuellement. » (Gouvernement du Québec, 2018a). En ce qui a trait au verre, la politique vise une valorisation de 60 % dans les municipalités, 95 % dans les ICI, et 60 % dans les CRD. (Gouvernement du Québec, 2018a)

Au terme de ses 10 ans, cette politique a permis d'améliorer la performance de la GMR au Québec. Au global, la quantité absolue de matière valorisée a doublé sur cet intervalle de temps. Toutefois, la génération de matières résiduelles a, dans cette même période, augmenté de près de 50 %. Considérant cette hausse, le taux de récupération est passé de 38 % à 52 %. Pour les résidus de verre, la quantité absolue mise en valeur en 2008 est près du double de la valeur enregistrée en 1998 pour le secteur municipal. Toutefois, le taux de récupération du verre résidentiel pour 2008 était de 47 % et n'atteignait donc pas la cible de 60 % fixée par la politique. (RECYC-QUÉBEC, 2009a) Le tableau 3.1 présente les quantités de matières résiduelles générées, éliminées et récupérées en 1998 et en 2008.

Tableau 3.1 Génération, élimination et récupération de matières résiduelles au Québec en 1998 et 2008
(inspiré de RECYC-QUÉBEC, 2009a, p. 3 et 8)

	1998		2008	
	Quantité absolue (tonnes)	Quantité relative (%)	Quantité absolue (tonnes)	Quantité relative (%)
Matières résiduelles générées	8 888 000	100	13 033 000	100
Matières résiduelles éliminées	5 537 000	62	6 717 000	48
Matières résiduelles recyclées	3 351 000	38	6 814 000	52
Résidus de verre mis en valeur (municipal)	34 000	Inconnu	67 000	Inconnu

3.1.3 Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 2011-2015

Adopté en 2011, un plan d'action de GMR divisé en 10 stratégies a permis de concrétiser certains objectifs de la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles sur l'horizon 2011-2015. Parmi les stratégies, on y retrouve à nouveau : la hiérarchie des 3RV-E, la responsabilisation des producteurs et la planification régionale. S'ajoutent également la reddition de compte, les efforts d'ISE et la stimulation de la performance du secteur des CRD. Les objectifs globaux, quant à eux, sont légèrement plus ambitieux. Au niveau du verre, la politique 2011-2015 vise le recyclage de 70 % des résidus. (MDDEP, s. d.)

3.2 La consigne

La consigne touche une grande quantité de contenants mis en marché au Québec. La consigne privée cohabite avec la consigne publique et les deux systèmes permettent de récupérer une grande quantité de contenants. Les sous-sections qui suivent décrivent d'abord les deux méthodes utilisées au Québec.

Certains regroupements québécois souhaiteraient voir la consigne s'étendre à davantage de contenants. Toutefois, le Québec se limite, depuis des années, à un nombre limité de récipients. Les freins à la consigne au Québec sont donc étudiés dans la présente section.

Enfin, d'autres exemples de consigne mis en place ailleurs au Canada seront décrits. Certaines de ces consignes, appliquées à une plus grande variété de contenants que les systèmes québécois, démontrent le potentiel de généraliser la consigne.

3.2.1 Évolution de la consigne au Québec

Consigne privée

La consigne sur les CRM existe au Québec depuis 1808 et est prise en charge par l'industrie brassicole (ABQ, 2018). En 2008, environ 1,3 milliard de bouteilles en verre brun de 341 mL étaient mises en marché annuellement et étaient consignées à 0,10 \$ (ABQ, 2008). Toutefois, de plus en plus de ces bouteilles disparaissent au profit de CRU en aluminium. Selon RECYC-QUÉBEC (2014a), « [...] le nombre de contenants de bière à remplissage multiple vendus a diminué de 34 % de 2005 à 2012. » En 2015, RECYC-QUÉBEC (2017a) continuait d'observer une diminution des CRM. Cependant, le taux de récupération des CRM reste à 98 % selon ABQ (2008, 2018) et RECYC-QUÉBEC (2014a). Les CRM récupérés sont lavés, réutilisés une quinzaine de fois puis recyclés à la fin de leur vie utile (ABQ, 2018 ; RECYC-QUÉBEC, 2014a).

Consigne publique

Les CRU, pour leur part, font l'objet d'une consigne publique depuis 1984. L'objectif initial de cette initiative gouvernementale était alors de réduire les déchets sauvages retrouvés sur le long des autoroutes (Charmard et Méthot, s. d.). Comme montré par la figure 3.1, la consigne est d'abord payée aux producteurs par les détaillants qui, à leur tour, sont payés par les consommateurs. Au retour des CRU, les détaillants remboursent les consommateurs et sont ensuite remboursés par les producteurs. Les détaillants sont ainsi au carrefour du système de la consigne publique et doivent mobiliser des employés et de l'espace, en plus de déboursier pour des gobeuses à CRU. Pour cette raison, les détaillants reçoivent une prime d'encouragement de 0,02 \$ par CRU retourné par le consommateur. Enfin, le producteur remet l'argent de la consigne à une société d'état (RECYC-QUÉBEC ou Boissons Gazeuses Environnement [BGE]) et est remboursé pour les contenants rapportés, incluant la prime de 0,02 \$. (RECYC-QUÉBEC, 2009b) Les surplus de la consigne provenant des contenants non rapportés reviennent à l'état et le système est autofinancé par ces derniers. Toutefois, la prime de 0,02 \$ entraîne un déficit au-delà d'un seuil de récupération donné. S'il est trop efficace, ce système est donc déficitaire.

Au cours des années 90, la consigne publique a été déficitaire dû à des taux de récupération supérieurs au seuil d'autofinancement. La hausse de la consigne sur certains contenants, notamment pour les contenants de plus de 450 mL maintenant consignés à 0,20 \$, a permis de relancer l'autofinancement de la consigne. (Olivier, 2015)

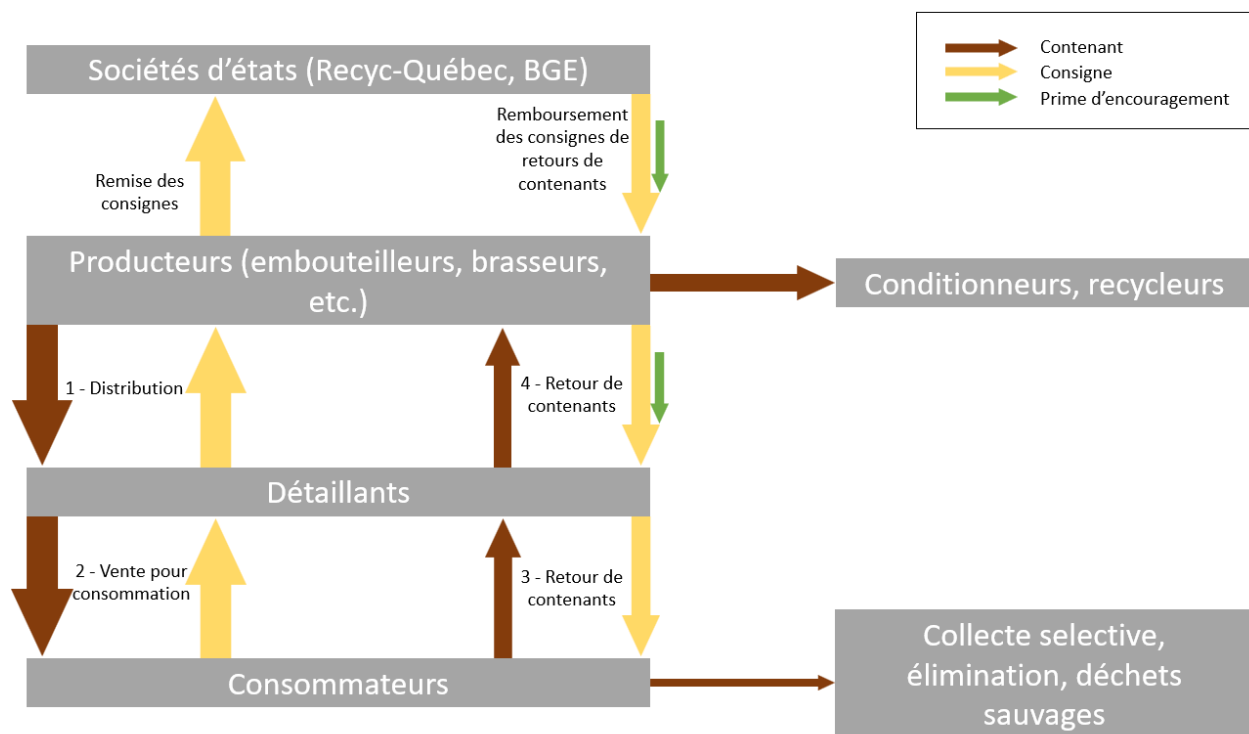


Figure 3.1 Fonctionnement de la consigne

Au contraire de la consigne privée, le nombre de contenants touchés par la consigne publique qui sont mis en marché augmente d'année en année. Entre 2005 et 2012, cette augmentation est de 179 % pour les CRU de bière. (RECYC-QUÉBEC, 2014a) Ce revirement de situation est limité par l'article 24 de l'Entente portant sur la consignation, la récupération et le recyclage des CRU de bière. Cet article stipule que, pour les bières vendues par les adhérents de cette entente tels que les détaillants, les CRU doivent représenter 37,5 % ou moins de leurs ventes. Si un adhérent dépasse ce ratio, il est tenu de verser une indemnité variant entre 0,02 et 0,18 \$ à RECYC-QUÉBEC. (RECYC-QUÉBEC, 2014b ; RECYC-QUÉBEC, 2018a)

La consigne publique affichait, en 2015, une performance globale de 70,7 % de récupération. Comme le montre la figure 3.2, le taux de récupération des CRU de verre oscille entre 70 et 80 % entre 2006 et 2016. Les taux de récupération sont détaillés à l'annexe 3. Cette dernière montre que les CRU en verre consignés à 0,10 \$ sont les plus courants et les plus récupérés, tandis que ceux consignés à 0,05 \$ sont les moins récupérés. (RECYC-QUÉBEC, s. d.) Il est possible de croire que les contenants consignés à 0,10 \$ sont régulièrement vendus en paquet de 6, 12 ou plus. De ce fait, il devient plus avantageux, pour le consommateur, de les récupérer pour en réclamer le dépôt. Pour ce qui est des CRU consignés 0,05 \$ ou 0,20 \$, ils sont souvent vendus à l'unité, ce qui les rend, d'un point de vue monétaire, moins intéressant à retourner.

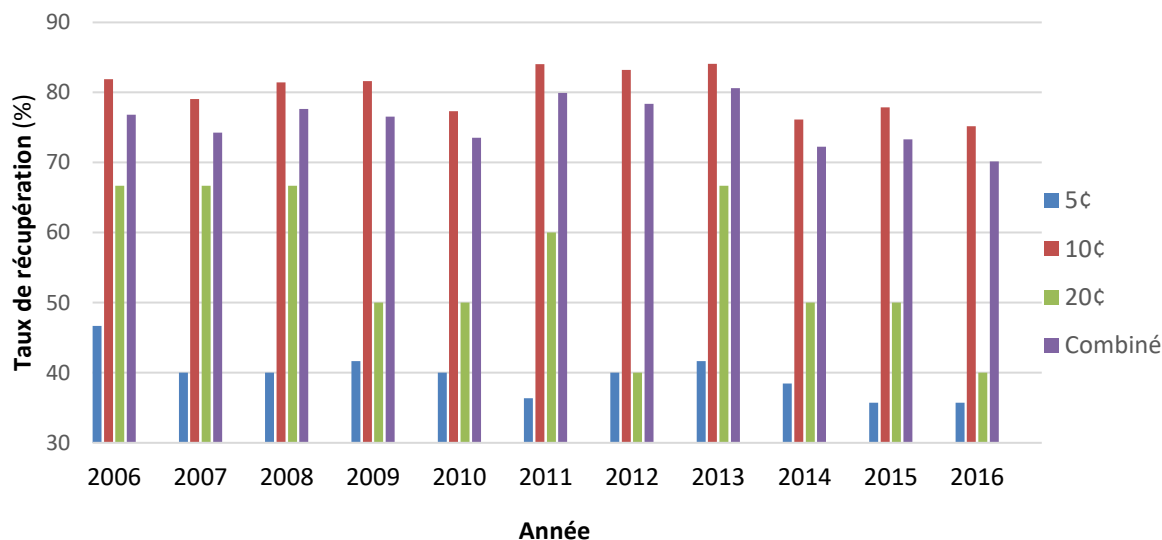


Figure 3.2 Taux de récupération des contenants à remplissage unique en verre consignés

3.2.2 Les freins à la consigne

Malgré les avantages de la consigne, incluant le taux de récupération élevé et le faible taux de contamination de la matière récupérée, certains contenants de verre ne sont pas consignés. Parmi ceux-ci, les contenants de vins et spiritueux sont très controversés. En effet, la SAQ, principal acteur dans la vente de vins et spiritueux, est fréquemment confrontée au sujet de l'absence de consigne sur les contenants qu'elle met en vente (Agence QMI, 2017, 9 décembre ; Genois Gagnon, 2015, 29 mai). Pourtant, ce gisement de verre est non-négligeable. En 2006, la SAQ a mis en marché 140 millions de contenants. Avec un poids moyen de 473 g, ceci représente 66 200 tonnes de verre (KPMG, 2006). À titre comparatif, les CRU de bière en verre représentaient 27 000 tonnes de verre la même année, comme vu à l'annexe 3.

Les raisons pour lesquelles la consigne sur les bouteilles de vins et spiritueux n'est pas implantée sont souvent d'ordre économique ou en lien avec l'existence d'un système de collecte sélective de porte à porte au Québec. D'ailleurs, la SAQ rappelait, en 2016, que le taux de récupération de ses contenants était de 85 %, soit plus élevé que la performance de la consigne publique. De plus, elle maintenait que la modernisation des centres de tri pour le tri du verre était en cours. Enfin, la société d'État finance différents projets de valorisation du verre. (SAQ, 2016) Malgré ces réalités, le taux de recyclage des bouteilles de vins et spiritueux, à l'instar de tous les autres contenants récupérés par la collecte de porte à porte, est actuellement très faible.

Une étude de faisabilité de la consigne sur les contenants de boissons alcoolisées a été livrée en 2006 par la firme KPMG, pour le compte de la SAQ (KPMG, 2006). Cette étude, rendue publique en 2016, s'intéressait particulièrement au coût d'implantation et d'exploitation d'une consigne sur les vins et spiritueux. De plus, elle révélait les impacts positifs et négatifs d'un tel système sur les différentes parties prenantes. Enfin, certains autres scénarios de gestion des contenants post-consommation vendus par la SAQ étaient abordés, de façon superficielle, afin d'alimenter la réflexion de la société d'État. Or, il est intéressant de s'attarder à certaines conclusions du rapport considérant qu'il ait pu être utilisé au cours de processus décisionnels dans le choix d'implanter ou non une telle consigne.

Coûts d'implantation et d'exploitation

Le rapport de KPMG, mandaté par la SAQ, révélait que le coût annuel pour l'exploitation d'un système de consignation et de gestion des contenants post-consommation se serait élevé à 24,8 millions de dollars, auquel se seraient ajoutés 11,3 millions la première année pour l'implantation (KPMG, 2006). Dans le document, cette somme était comparée aux coûts réels de l'implication de la SAQ dans les efforts québécois de GMR qui s'élevaient, à l'époque, à 3,5 millions de dollars. Ces efforts proviennent du fonds environnemental de la SAQ, lui-même financé par le prélèvement de 0,02 \$ sur chaque bouteille vendue. En comparaison avec ce fonds environnemental, l'exploitation de la consigne présentait donc des coûts supplémentaires annuels de 21,3 millions de dollars. (KPMG, 2006)

Le document de KPMG démontrait également que les coûts d'exploitation annuels peuvent être en partie absorbés par certains financements. D'abord, les prélèvements pour le fonds environnemental (PFE) de 0,02 \$ par bouteille vendue pourraient servir à financer ce système, et ce, à raison de 3,5 millions de dollars par année. Ensuite, les dépôts non réclamés par les consommateurs serviraient à financer le système. Pour des consignes s'échelonnant de 0,10 \$ à 0,40 \$, le financement provenant des dépôts non réclamés, fixés par l'étude à 25 %, s'élèverait respectivement à 4,3 et 17,2 millions. Comme le montre le tableau 3.2, le manque à gagner afin de financer un tel système de consigne oscillerait entre 4,1 et 17 millions de dollars.

Tableau 3.2 Financement et manque à gagner pour un système de consigne sur les contenants de vins et spiritueux (inspiré de : KPMG, 2006, p. 38)

Valeurs moyennes attribuées à la consigne (\$)	0,10	0,25	0,40
Coût d'exploitation annuel (Millions \$)	24,8		
Nombre de contenants vendus (Millions de contenants)	172,0		
Taux de récupération	75 %		
Quantité de contenants récupérés (Millions de contenants)	129,0		
Quantité de contenants non récupérés (Millions de contenants)	43,0		
Valeur totale des dépôts non réclamés par les consommateurs (pollueurs-payeurs) (Millions \$)	4,3	10,8	17,2
Manque à gagner excluant les PFE (Millions \$)	20,5	14,1	7,6
PFE (Millions \$)	3,5		
Manque à gagner total (Millions \$)	17,0	10,6	4,1

Cependant, certaines données ont changé depuis cette étude. D'abord, suivant l'inflation, le coût d'exploitation s'établirait actuellement à 30,2 millions de dollars (Banque du Canada, 2018). Ensuite, il est intéressant de rappeler que les contenants de vins et spiritueux sont présentement soumis à une tarification lors de leur mise en marché afin, entre autres, de financer la collecte sélective (*Règlement sur la compensation pour les services municipaux fournis en vue d'assurer la récupération et la valorisation de matières résiduelles*). Ces frais, selon ÉEQ, doivent être couverts par la SAQ (ÉEQ, échange de courriels, 23 mars 2018). En transposant les données du rapport de KPMG concernant le nombre (172 millions) et le poids moyen (0,473 kg) des contenants vendus, ainsi que le tarif actuel des contenants de verre selon ÉEQ (0,19 \$/kg), la mise en marché des bouteilles de vins et spiritueux coûterait annuellement 15,5 millions de dollars (ÉEQ, 2018a ; KPMG, 2006). Ce coût correspond à 0,09 \$ par bouteille et il est possible de croire qu'il pourrait se refléter directement sur le coût du produit vendu au consommateur. Or, selon le même règlement (*Règlement sur la compensation pour les services municipaux fournis en vue d'assurer la récupération et la valorisation de matières résiduelles*), sont exemptées :

« [...] les personnes déjà tenues, en vertu d'un système de consignation reconnu en vertu d'une loi au Québec, de prendre ou de contribuer financièrement à des mesures de récupération et de valorisation des contenants ou des emballages visés par ce système, tel les contenants à remplissage unique utilisés pour la bière et les boissons gazeuses [...] ».

Ainsi, ces 0,09 \$ peuvent être considérés lors de la comparaison entre un scénario de consignation et le système actuel. Ce montant peut même être maintenu dans le coût des produits comme source de financement pour la consigne, tout comme il est actuellement utilisé pour financer la collecte sélective. Ce système pourrait alors être comparé à une consigne différée selon laquelle une partie de la consigne

payée par le consommateur n'est pas remboursable au retour du contenant. Ce système est déjà utilisé ailleurs au Canada, tel que vu à la section 3.2.3. Enfin, le scénario de KPMG ne considère pas la vente de la matière récupérée comme source de revenu et de financement du système. Pourtant, le verre récupéré, tel que celui issu de la consigne publique sur les CRU de verre, peut être vendu aux recycleurs à 100 \$/tonne (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018). Ce prix est celui demandé par les conditionneurs tel que 2M Ressources. Il ne faut donc pas croire que la SAQ puisse obtenir 100 \$/tonnes de contenants récupérés. Cependant, il est envisageable que la société d'État puisse vendre son verre récupéré aux conditionneurs à un certain prix. Le tableau 3.3 présente l'ajustement du manque à gagner dans le scénario de KPMG pour l'exploitation d'un système de consigne. Cette version ajustée prend en compte l'ajout d'une consigne différentielle de 0,09 \$ en remplacement du tarif pour l'aide à la collecte sélective, le taux d'inflation entre 2006 et 2018, ainsi que la vente aux conditionneurs de la matière récupérée par la SAQ au prix de 20 \$/tonne, soit 20 % du prix de vente actuel du verre récupéré payé par les recycleurs. Cette valeur est définie arbitrairement et considère avec prudence qu'à ce prix, les conditionneurs peuvent décontaminer la matière et la vendre à profit. Il est à noter que ce scénario considère les mêmes taux de récupération et nombre de contenants mis en marché que l'étude de KPMG, soit les valeurs de 2006. Dans les faits, le nombre de contenants mis en marché par la SAQ était en croissance constante entre 2004 (168 millions d'équivalents de bouteilles de 750 mL) et 2013 (239 millions d'équivalents de bouteilles de 750 mL) (Buist et al., 2015). Dans son dernier rapport, la SAQ évaluait à 198,0 L le volume de produits vendus en 2017, soit 264 millions d'équivalents de bouteille de 750 mL (SAQ, 2017).

Tableau 3.3 Financement et manque à gagner ajustés pour un système de consigne sur les contenants de vins et spiritueux

Valeurs moyennes attribuées à la consigne (\$)	0,10	0,25	0,40
Coût d'exploitation annuel (Millions \$)	30,2		
Nombre de contenants vendus (Millions de contenants)	172,0		
Taux de récupération	75 %		
Quantité de contenants récupérés (Millions de contenants)	129,0		
Quantité de contenants non récupérés (Millions de contenants)	43,0		
Valeur totale des dépôts non réclamés par les consommateurs (pollueurs-payeurs) (Millions \$)	4,3	10,8	17,2
Manque à gagner excluant les PFE (Millions \$)	25,9	19,5	13,0
PFE (Millions \$)	3,5		
Manque à gagner total (Millions \$)	22,4	16,0	9,5
Vente de la matière (20 \$/tonne, 0,473 kg/contenant) (Millions \$)	1,2		
Ajout d'une consigne différentielle de 0,09 \$ (Millions \$)	15,5		
Manque à gagner révisé (Millions \$)	5,6	-0,9	-7,3

Ce scénario démontre qu'une consigne de 0,25 \$ (0,35 \$ en considérant la consigne différentielle) permettrait d'engendrer des profits pour l'état québécois. Le point d'autofinancement sans profit se situe, quant à lui, à 0,225 \$. Il est à noter que le poids moyen des bouteilles de la SAQ est en baisse, notamment afin de réduire les émissions de GES liées au transport (Duplessis Piché, 2012, 6 novembre). Ainsi, une réduction de 20 % du poids des bouteilles se répercuterait directement sur la quantité de matière pouvant être vendue aux conditionneurs.

Le scénario de KPMG présente cependant des limites. Celles-ci sont également transposées dans le scénario ajusté du tableau 3.3. Parmi les plus notables, il est important de rappeler le choix de KPMG de ne considérer qu'un taux de récupération, soit de 75 %, indépendamment du montant de la consigne. Ce choix, fait par KPMG, est compréhensible considérant la difficulté de prévoir la performance d'un tel système. Cependant, la réalité québécoise des CRU en verre montre que le taux de récupération varie de façon importante en fonction du montant de la consigne. Comme vu à la section 3.2.1, il semble que, pour un nombre mis en marché similaire, les CRU de verre consignés à 0,05 \$ sont moins récupérés que ceux consignés à 0,20 \$. Il semble également que les CRU de verre consignés à 0,10 \$ sont les plus communs sur le marché et qu'ils mènent aux taux de récupération les plus élevés. Il a déjà été proposé que ce haut taux de récupération pouvait être lié au fait que ces contenants sont souvent vendus en groupe de 6, 12 ou 24 contenants, augmentant l'impact global de la consigne. Or, les bouteilles de vin sont vendues à l'unité, à l'instar des CRU actuels consignés à 0,05 \$ et 0,20 \$. On pourrait donc s'attendre à des taux de récupération plus faibles que le 75 % établi par KPMG. À titre indicatif, les CRU consignés à 0,20 \$ étaient récupérés en moyenne à 61 % entre 2006 et 2016 (RECYC-QUÉBEC, s. d.). Le tableau 3.4 démontre l'impact de cette différence de taux de récupération sur le manque à gagner pour les deux scénarios analysés précédemment, et ce, sur des consignes de 0,20 \$.

Les valeurs ajustées pour un taux de récupération de 61 % démontrent des manques à gagner moins importants. Selon le scénario ajusté, une consigne à 0,20 \$ ayant les mêmes taux de récupération que les CRU à 0,20 \$ actuels serait même profitable.

Tableau 3.4 Financement et manque à gagner pour un système de consigne sur les contenants de vins et spiritueux selon un taux de récupération basé sur la consignation des CRU actuels

	Scénario KPMG 2006		Scénario ajusté 2018	
Valeurs moyennes attribuées à la consigne (\$)	0,20			
Coût d'exploitation annuel (Millions \$)	24,8		30,2	
Nombre de contenants vendus (Millions de contenants)	172,0		172,0	
Taux de récupération	75 %	61 %	75 %	61 %
Quantité de contenants récupérés (Millions de contenants)	129,0	104,9	129,0	104,9
Quantité de contenants non récupérés (Millions de contenants)	43,0	67,1	43,0	67,1
Valeur totale des dépôts non réclamés par les consommateurs (pollueurs-payeurs) (Millions \$)	8,6	13,4	8,6	13,4
Manque à gagner excluant les PFE (Millions \$)	16,2	11,4	21,6	16,8
PFE (Millions \$)	3,5		3,5	
Manque à gagner total (Millions \$)	12,7	7,9	18,1	13,3
Vente de la matière (20 \$/tonne, 0,473 kg/contenant) (Millions \$)			1,2	1,0
Ajout d'une consigne différentielle de 0,09 \$ (Millions \$)			15,5	
Manque à gagner révisé (Millions \$)			1,4	-3,2

Une seconde limite de l'étude est le manque de différents scénarios de transport de la matière récupérée. En effet, à la demande de la SAQ, KPMG considère que le transport des bouteilles vides se fait par des entreprises externes (KPMG, 2006). Or, il aurait été possible de considérer que les contenants vides soient récupérés par les camions de livraison opérés par la SAQ et qui, à l'heure actuelle, peuvent repartir vides. Il est connu que les déplacements d'un camion vide ne sont pas profitables. L'exploitation de ces camions vides pourrait donc diminuer le coût en transport du système de consigne. Par exemple, 44 % des dépenses liées au transport sont attribuables à la main d'œuvre. Or, les camionneurs de la SAQ sont déjà payés pour conduire leurs camions vides à la suite d'une livraison. Ces dépenses pourraient donc être diminuées de quelques millions de dollars. De plus, le scénario de KPMG (2006) présumait déjà « [...] que les contenants vides seraient recueillis au même rythme que l'approvisionnement de la succursale [...] ». Ainsi, l'utilisation des camions de livraison de la SAQ permettrait de respecter cette présomption. Des problématiques techniques et des enjeux de salubrité et de santé et sécurité au travail pourraient toutefois s'opposer à un tel scénario. En effet, les bouteilles vides pourraient être salissantes pour les camions ou présenter un danger pour les livreurs. Une étude de faisabilité pourrait lever le voile sur les limites de cette suggestion.

Il est à noter que les limites du rapport liées au taux de récupération fixe et de l'utilisation d'une flotte de camion d'une entreprise externe ont déjà été relevées par le Front commun québécois pour une gestion écologique des déchets (FCQGED) lors de leur analyse du rapport de KPMG (FCQGED, 2016).

Enjeux, défis, risques et contraintes

Dans le sommaire exécutif de son rapport, KPMG relève certains enjeux, défis, risques et contraintes auxquels ferait face un projet d'implantation de consigne sur les contenants de vins et spiritueux par la SAQ. La figure 3.3 reprend ceux-ci.

Enjeux, défis	Risques	Contraintes
<ul style="list-style-type: none"> ■ Atteindre les objectifs de la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles ■ Maintenir le niveau de rentabilité actuel ■ Maintenir le niveau de satisfaction de la clientèle 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Perte de profitabilité due aux coûts associés à l'exploitation du système de consigne ■ Diminution potentielle de la capacité à verser des dividendes à l'actionnaire ■ Insatisfaction potentielle de la clientèle pour les raisons suivantes : <ul style="list-style-type: none"> – Hausse possible des tarifs – Réduction possible de l'offre de produits – Déplacement requis pour récupérer ses contenants – Incapacité à retourner ses contenants dans les marchés en alimentation 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Contraintes physiques entourant l'emplacement de plusieurs succursales rendant impossible l'expansion requise afin d'opérer le système de consigne à l'étude ■ Des délais importants de mise en place du système de consigne doivent être envisagés afin de bâtir le réseau et le rendre opérationnel

Figure 3.3 Enjeux, défis, risques et contraintes liés à l'implantation d'un système de consigne sur les contenants de vins et spiritueux (tiré de : KPMG, 2006, p. 4)

Encore aujourd'hui, il est intéressant de considérer ces enjeux, défis, risques et contraintes. Certains de ces derniers peuvent même, actuellement, encourager l'implantation de la consigne des contenants de vins et spiritueux. Par exemple, l'enjeu de l'atteinte des objectifs de la politique québécoise de GMR est, selon les statistiques récentes, à l'avantage d'un système de consigne. En effet, avec un taux de récupération de 71,0 % en 2015 et un taux de recyclage probable de 100 % sur cette matière récupérée, la consigne sur les CRU de verre atteint l'objectif de 70 % de recyclage des résidus de verre de la politique actuelle. Au contraire, le verre récupéré par la collecte sélective n'était recyclé qu'à 14 % en 2015, n'atteignant pas l'objectif québécois. (MDDEP, s. d. ; RECYC-QUÉBEC, 2017a)

Pour continuer, plusieurs des enjeux, défis, risques et contraintes énoncés sont d'ordres économiques : la rentabilité, la rentabilité et la capacité à verser les dividendes. Il a été démontré, à la sous-section précédente, qu'un système de consigne implanté en 2018 pourrait être profitable. Effectivement, en maintenant les PFE, en assurant la vente du verre récupéré, en convertissant en consigne différentielle les 0,09 \$ de la tarification pour le soutien à la collecte sélective et en considérant des taux de retour réalistes de 61 %, une consigne remboursable de 0,20 \$ permettrait des profits de plus de trois millions de dollars. Enfin, si un tel système était effectivement profitable, il est possible qu'il ne mène pas à une hausse du prix des produits offerts par la SAQ.

Ensuite, il est à noter que le concept de satisfaction des clients est de moindre importance pour les organisations en situation de monopole (Réseau des administrations publiques européennes [EUPAN], 2008). Or, malgré une compétition de la part des détaillants privés qui vendent certains vins, la SAQ garde le monopole de la majorité des produits. Peu importe leur taux de satisfaction, les clients de la SAQ sont donc « [...] contraints de consommer leurs services [...] » (EUPAN, 2008). De plus, une consigne sur les contenants de vins et spiritueux ferait de toute évidence l'objet d'un projet de loi visant non seulement la SAQ, mais bien tous les détaillants qui assurent la vente de ces produits ou de leur contenu. Ainsi, si baisse de la satisfaction de la clientèle il y aurait, celle-ci devrait être équivalente pour tous les détaillants. Enfin, les compétiteurs indirects de la SAQ, soit les détaillants qui font la vente de bières, sont déjà soumis à des systèmes de consigne (privé et public). Ceux-ci seraient donc actuellement désavantagés face aux détaillants tels que la SAQ qui vendent des alcools dans des contenants non consignés.

Il est également noté que les déplacements requis pour rapporter les contenants vides pourraient importuner les consommateurs. Il est toutefois envisageable que, dans plusieurs cas, ces retours soient effectués lors de visites à la SAQ dans le but d'acheter des produits. Actuellement, pour la consigne publique, ce sont 85 % des déplacements liés au retour des contenants qui sont mutualisés à d'autres activités (Buist et al., 2015). Enfin, comme le mentionne l'ABQ (2008) la consigne peut également être vue comme « [...] un incitatif pour attirer les clients dans [les] succursale[s], le remboursement de la consigne créant un effet d'achalandage. »

Pour ce qui est des problématiques d'espace liées à l'entreposage des contenants vides, il s'agit très probablement d'une problématique réelle dans certains points de services de la SAQ ou pour les titulaires de permis. Cette problématique pourrait être palliée, dans certaines succursales, par l'installation de conteneurs semi-enfouis tels que ceux vus sur la figure 3.4. En effet, lors de leur retour chez les détaillants,

les contenants vides pourraient être accumulés dans des conteneurs dont la majorité du volume est sous-terrain et qui peuvent, lorsque remplis, être vidés dans un camion ou remplacés par des conteneurs vides.

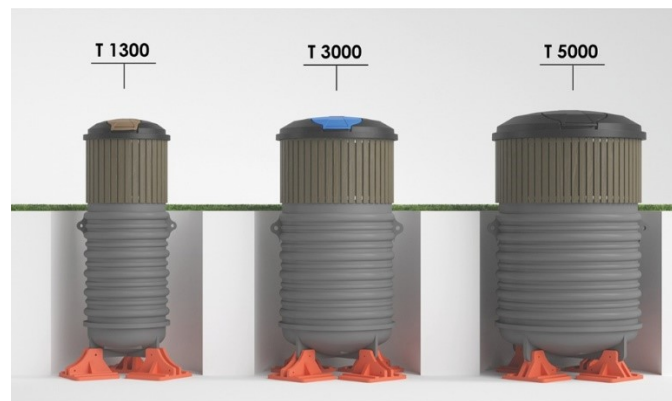


Figure 3.4 Exemples de conteneurs semi-enfouis qui pourraient permettre l'entreposage des contenants consignés vides (tiré de : Les Conteneurs Semi-Enfouis TOTEM, 2017)

Enfin, dans le choix de l'implantation ou non d'une consigne, il est important de considérer les délais pour sa mise en place et son opérationnalisation. Il faut toutefois considérer ces facteurs pour les options à la consigne. Par exemple, le système actuel, impliquant la collecte sélective de porte à porte et les centres de tri, offre une mauvaise performance de recyclage du verre. L'amélioration de ce dernier système nécessite, à l'instar de l'implantation de la consigne, des délais qui doivent être pris en compte dans le processus décisionnel.

Autres considérations pour la consigne

Le rapport évite certains paramètres dans son étude. Par exemple, l'impact environnemental de la gestion du verre est sous-représenté. Le taux de pureté du verre récupéré et le taux de recyclage sont peu considérés dans cette étude. Or, la consigne peut permettre de limiter la contamination des résidus de verre et en faciliter le recyclage. La collecte sélective ne possède actuellement pas ces avantages.

Autres considérations contre la consigne

Il est important de rappeler que la consigne pourra difficilement régler l'entièreté du problème du verre au Québec. En effet, même avec une consigne sur les vins et spiritueux, certains contenants de verre ne seront vraisemblablement pas consignés, notamment les emballages de produits alimentaires. Plusieurs de ces produits sont considérés comme des produits alimentaires de base. Ces produits, pour des raisons évidentes liées aux besoins fondamentaux de l'humain, sont détaxés (TPS ET TVQ) (*Loi sur la taxe de vente du Québec* ; Revenu Québec, 2013). Pour les mêmes raisons, il pourrait être difficile d'appliquer une

consigne sur ces produits. Ainsi, les contenants alimentaires de verre devront être récupérés par la collecte sélective. Les centres de tri continueront donc à recevoir du verre. Le développement et l'achat de technologies pour le tri du verre reste donc des nécessités, peu importe si la consigne est appliquée ou non.

Ensuite, l'arrivée d'une consigne pourrait avoir un impact important sur les activités de retour de contenants et d'entreposage des marchés d'alimentation. Actuellement, tous les détaillants qui vendent un produit emballé dans un CRU soumis à la loi sont tenus de récupérer n'importe quel CRU consigné, peu importe si le détaillant vend le produit rapporté (*Loi sur la vente et la distribution de bière et de boissons gazeuses dans des contenants à remplissage unique* ; RECYC-QUÉBEC, 2009b). Si les contenants de vins et spiritueux deviennent consignés, seront-ils considérés au même titre que les autres CRU au sens de la loi, ou seront-ils différenciés ? Un détaillant qui ne vend aucun vin sera-t-il tenu de récupérer les bouteilles de vin vides ? Si c'est le cas, les supermarchés risquent de recevoir une grande quantité de contenants de vins et spiritueux vendus par la SAQ. En effet, selon KPMG (2006), les Québécois visitent les supermarchés autorisés à vendre des produits de la SAQ entre 1,5 et 2 fois par semaine, alors qu'ils visitent l'une des succursales de la SAQ environ 1,5 fois par mois. Statistiquement, s'ils peuvent rapporter leurs contenants chez n'importe quel détaillant, il y a donc plus de chance que les consommateurs rapportent leurs contenants vides dans les marchés d'alimentation.

Au contraire, si les contenants de vins et spiritueux sont considérés différents des autres CRU consignés, les consommateurs pourraient être confus à savoir où rapporter leurs contenants.

3.2.3 Applications de la consigne au Canada

Le Canada bénéficie d'une grande diversité de programmes de consignes au travers de ses provinces et territoires. La grande majorité des provinces et territoires canadiens ont mis en place des systèmes de consignes appliqués à une plus grande gamme de produits que le Québec, incluant les contenants de vins et spiritueux. Le Québec, s'il désire améliorer les performances de sa GMR, a la chance de pouvoir étudier ces systèmes, en faire ressortir les points les plus positifs et s'en inspirer. Les sections qui suivent font un survol de certains de ces programmes, ainsi que de leur performance.

Nouveau-Brunswick

La consigne néo-brunswickoise a été établie en 1992 afin de diminuer l'élimination de matières et les déchets sauvages (Le gouvernement du Nouveau-Brunswick, s. d.). Le système, encadré par la *loi sur les*

réipients à boisson et son règlement, vise tous les contenants de boissons de cinq litres et moins, excluant les produits laitiers, les substituts de lait, les boissons concentrées, les substituts de repas liquides et les cidres non pasteurisés (*Loi sur les réipients à boisson* ; Re-Centre, s. d. ; *Règlement du Nouveau-Brunswick* 99-66). Il couvre donc une gamme de produits beaucoup plus étendue que le programme québécois, incluant les boissons alcoolisées, les jus, les boissons gazeuses et l'eau.

Le Nouveau-Brunswick a choisi d'implanter une consigne différentielle : lors du retour d'un contenant, 50 % de la consigne est remboursée au consommateur. La seconde moitié, le droit de protection de l'environnement, sert en partie à financer le programme, tout comme les consignes non réclamées. Les surplus sont versés au Fonds en fiducie pour l'environnement du Nouveau-Brunswick. (*Loi sur les réipients à boisson*). Ce Fonds permet de financer « [...] les projets visant à protéger, à préserver et à embellir l'environnement naturel de la province [...] » (Le gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2018a). Les consignes totales sont de 0,10 \$ pour les contenants de moins de 500 mL, et de 0,20 \$ pour les autres. Enfin, les consignes CRM sont remboursées à 100 % au consommateur lorsqu'elles sont réclamées. (CM Consulting, 2014)

Les CRM et CRU consignés peuvent être rapportés dans plus de 75 centres de dépôt privés autorisés par le Ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick (CM Consulting, 2014). Grâce à ce système, la province obtenait un taux de récupération de 76 % pour la période 2014-2015. En ce qui a trait au verre, la performance de récupération des CRU était de 72 %. (CM Consulting, 2016).

La *loi sur les réipients à boisson* contient certains autres articles qui promeuvent l'environnement de différentes façons. L'article 12 interdit de promouvoir les réipients recyclables plutôt que les réipients réutilisables. Cet article met donc de l'avant le principe des 3RV-E. L'article 8, quant à lui, interdit l'utilisation d'anneaux en plastiques pour tenir les canettes d'aluminium en paquet. (*Loi sur les réipients à boisson*)

Nouvelle-Écosse

La Nouvelle-Écosse gère un système de consigne fort semblable à celui du Nouveau-Brunswick, basé sur une consigne différentielle. Ses taux de récupération atteignaient 84 % pour l'ensemble des matières, et 83 % pour le verre.

Ontario

Le gouvernement ontarien a mis en place, en 2007, le Programme de consignation de l'Ontario. Celui-ci est encadré par la *Loi sur les alcools* et le *Règlement de l'Ontario 13/07 (Loi sur les alcools ; Règlement de l'Ontario 13/07 : Programme de consignation de l'Ontario)*. Ce système est pris en charge par la Régie des alcools de l'Ontario (LCBO). Cependant, l'entité privée The Beer Store (TBS), qui s'occupait déjà des CRM de l'industrie ontarienne de la bière depuis 1927, a été mandatée pour gérer certaines portions du programme en parallèle avec ses propres activités. Avec plus de 440 magasins, TBS est en grande partie responsable de la collecte, du conditionnement, du service à la clientèle et de la promotion du programme. Pour ses services, TBS recevait, en 2012, 0,101 5 \$ par contenant collecté. (CM Consulting, 2014 ; Pro-consigne Québec, 2018)

Le programme vise les contenants de bières, de vins et de spiritueux. Le tableau 3.5 représente les différents contenants touchés et le montant de leur consigne associée. Le système est financé par les consignes non réclamées et par le gouvernement ontarien (CM Consulting, 2014 ; Pro-consigne Québec, 2018). Selon TBS, 94 % des contenants visés sont recyclés, faisant épargner 40 millions de dollars par année aux contribuables en frais d'élimination (TBS, 2015). Apparemment, le coût du programme serait bien inférieur à ce montant, le rendant profitable pour les contribuables (Moroz, 2014, 9 janvier). Enfin, selon CM Consulting (2016), les bouteilles de vins et spiritueux en verre étaient récupérées à 82 %.

Tableau 3.5 Contenants visés par le Programme de consignation de l'Ontario (inspiré du *Règlement de l'Ontario 13/07 : Programme de consignation de l'Ontario*, 2007, p. 3)

Contenant réglementé	Consigne (\$)
Contenants en verre d'une capacité maximale de 630 mL	0,10
Contenants en verre d'une capacité supérieure à 630 mL	0,20
Canettes en aluminium ou en métal d'une capacité maximale de 1 L	0,10
Canettes en aluminium ou en métal d'une capacité supérieure à 1 L	0,20
Contenants Tetra Pak (multicouches) et viniers d'une capacité maximale de 630 mL	0,10
Contenants Tetra Pak (multicouches) et viniers d'une capacité supérieure à 630 mL	0,20
Contenants en PET (plastique) d'une capacité maximale de 630 mL	0,10
Contenants en PET (plastique) d'une capacité supérieure à 630 mL	0,20

Colombie-Britannique

Le règlement encadrant la consigne sur les contenants en Colombie-Britannique, le *Beverage Container Stewardship Program Regulation*, existe depuis 1997. Actuellement, le programme vise tous les breuvages prêts-à-boire, excepté les laits et leurs substituts végétaux, les formules pour bébés, les repas en boissons

et les suppléments diététiques. Elle couvre donc, entre autres, l'eau, les boissons alcoolisées, les boissons gazeuses et les jus. Les dépôts varient entre 0,05 \$ et 0,20 \$ et sont représentés dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6 Contenants visés par le *Beverage Container Stewardship Program Regulation* (inspiré de CM Consulting, 2016, p. 55)

Contenant réglementé	Consigne (\$)
Boissons non-alcoolisées, contenants ≤ 1L	0,05
Boissons non-alcoolisées, contenants > 1L	0,20
Vins et spiritueux, contenants ≤ 1L	0,10
Vins et spiritueux, contenants > 1L	0,20
Bières, contenants ≤ 1L	0,10

Les contenants peuvent être rapportés dans 1 430 établissements. Ces organisations sont compensées pour chaque contenant qu'elles collectent. Le montant de compensation est négocié par chaque établissement et dépend de chaque contenant. Ces compensations unitaires sont de l'ordre de 0,027 \$ à 0,112 7 \$ (CM Consulting, 2016).

Le système est financé en partie par les dépôts non-réclamés et par la vente de la matière récupérée. La balance du coût d'exploitation est payée par l'ajout de frais de recyclage de contenant (CRF) au prix des produits vendus aux consommateurs. Les montants des CRF sont uniques pour chaque type de contenant, en fonction de son taux de récupération (retour de consigne) et de recyclage (vente de la matière récupérée). Par exemple, si un type de contenant affiche un haut taux de retours, mais qu'il est difficilement recyclable, les frais associés à sa récupération sont difficilement autofinancés par les consignes non réclamées, ni par la vente de la matière. De ce fait, ses CRF seront élevés. À l'inverse, si un type de contenant est rarement retourné, mais qu'il est facilement recyclable, il générera des profits grâce aux consignes non réclamées et à la vente de la matière. Ainsi, ses CRF seront faibles puisque la consigne s'autofinance. (CM Consulting, 2014 et 2016)

Ce système est donc toujours autofinancé alors que les CRF sont régulièrement ajustés pour balancer les surplus ou les déficits. Son intérêt réside dans le fait qu'il désavantage les matériaux qui sont peu recyclés. En 2014, les CRF s'élevaient à 0,01 \$ pour les canettes d'aluminium, et à 0,30 \$ pour certains contenants de verre (CM Consulting, 2014).

Enfin, la consigne britanno-colombienne affichait, en 2014, des taux de récupération moyens de 84 %. Plus précisément, le verre atteignait des performances de 90 %. (CM Consulting, 2016)

Saskatchewan

La consigne la plus élevée au Canada se trouve en Saskatchewan et concerne les bouteilles de verre d'un litre et plus, consignées à 0,40 \$. Le programme de la Saskatchewan s'applique à toutes les boissons, excepté les concentrés, les jus pour bébés, les repas liquides et les suppléments diététiques. Aux consignes remboursables s'ajoutent des frais non remboursables variant entre 0,03 \$ et 0,06 \$. Ces frais permettent de financer le système de consignation, tout comme les dépôts non-réclamés et la vente des matériaux récupérés. Avec 71 centres de dépôt autorisés, la Saskatchewan réussit à récupérer 87 % de ses contenants, dont 94 % de ceux en verre. (CM Consulting, 2016)

3.3 La collecte sélective de porte à porte

La collecte sélective de porte à porte est la méthode la plus généralisée pour la gestion des matières recyclables. Avec près d'une quarantaine d'années d'histoire, ce système présente des performances variables. La présente section s'intéresse donc aux réussites et aux défis de cette méthode.

3.3.1 Applications de la collecte sélective de porte à porte au Québec

Évolution de la collecte sélective au Québec

L'intérêt du gouvernement québécois pour la collecte sélective commence dans les années 1970. À la fin des années 70 et au début de la décennie suivante, la récupération par apport volontaire fait son apparition, ainsi que les premiers centres de tri. Cependant, cette pratique demandait trop d'efforts pour les citoyens qui, à ce moment, n'étaient pas assez sensibilisés pour vouloir s'impliquer. C'est en 1985 que les premiers projets pilotes de collecte sélective s'implantent, soit à L'Ancienne-Lorette, à Victoriaville et à LaSalle. Suivent ensuite certains quartiers de Montréal. En 1989, l'organisme Collecte sélective Québec est créé et a pour but d'implanter cette pratique partout au Québec au cours des années 1990. (Chamard et Méthot, s. d.) À cette époque, le citoyen doit séparer, dans son bac, certaines de ses matières pour faciliter la vie aux centres de tri.

Dans les années 2000, la collecte sélective de porte à porte devient encore plus facile pour les citoyens grâce à l'implantation de la collecte pêle-mêle et à l'automatisation des camions. Ces changements permettent le déploiement des bacs roulants de 360 litres et la réduction de la fréquence de la collecte.

C'est également dans les années 2000 que le programme de compensation de la collecte sélective est mis sur pied. (Chamard et Méthot, s. d.) Grâce à celui-ci, les entreprises doivent déboursier pour la mise en marché de leurs emballages et cet argent est redistribué aux municipalités pour financer leurs programmes de collecte. Enfin, les années 2010 voient le déploiement d'une troisième collecte dans plusieurs municipalités : la collecte des résidus organiques.

Performances

En 2015, la collecte sélective de porte à porte avait permis d'amasser 996 000 tonnes de matières, dont 808 000 tonnes ont été vendues pour être recyclées (RECYC-QUÉBEC, 2017a). Cette quantité représente 120 kg/habitant de matières recyclables collectées, selon les données démographiques de l'Institut de la statistique du Québec (Gouvernement du Québec, 2015).

Pour la période 2012-2013, le verre représentait 16 % des matières récupérées par la collecte sélective résidentielle. C'étaient donc 111 500 tonnes de verre, réparties en 86 200 tonnes de bouteilles et 25 400 tonnes de contenants alimentaires, qui avaient été récupérés. (ÉEQ et RECYC-QUÉBEC, 2015) De cette quantité, 66 000 tonnes avaient été vendues par les centres de tri, soit 59 % de la matière. Comparativement, en 2015, les centres de tri québécois n'avaient vendu que 23 000 tonnes de verre. (RECYC-QUÉBEC, 2017a) Cette dernière statistique démontre que, malgré les performances de la collecte sélective, les centres de tri ont de la difficulté à décontaminer le verre reçu par la collecte pêle-mêle.

Selon l'étude de caractérisation des matières résiduelles résidentielles que les firmes DESSAU et NI Environnement ont effectuée pour la période 2012-2013 pour le compte d'ÉEQ et RECYC-QUÉBEC, 84,9 % des bouteilles de verre mises en marché et dédiées à la collecte sélective avaient été récupérées. Toujours selon cette étude, 59,2 % des contenants alimentaires mis en marché avaient été récupérés. Enfin, 9 800 tonnes de bouteilles de verre consignées s'étaient retrouvées dans les bacs de récupération. (ÉEQ et RECYC-QUÉBEC, 2015)

Il est intéressant de rappeler que la récupération par collecte sélective de porte à porte est plus performante, toutes matières confondues, en maisons unifamiliales (65,6 %) qu'en blocs multi logements (48,1 %). Aucune donnée n'a été trouvée concernant les taux de récupération du verre au niveau des ICI. (ÉEQ et RECYC-QUÉBEC, 2015)

Pureté du verre

La performance générale du système actuel de collecte sélective en porte à porte dépend grandement de la capacité des centres de tri et des conditionneurs à séparer le verre des autres matières et vice-versa. Avant 2013, le conditionneur Klareco traitait et purifiait 80 % du verre issu de la collecte sélective québécoise, permettant de fournir Owens-Illinois en calcin (Conseil régional de l'environnement de Montréal, 2012b). L'entreprise pouvait alors intégrer jusqu'à 65 % de calcin dans ses procédés (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018). Toutefois, sa fermeture en 2013 a plongé le Québec dans une crise du verre. Les centres de tri sont incapables de traiter et purifier le verre de façon à répondre aux besoins des recycleurs. En fait, selon l'analyse des résultats de son questionnaire distribué aux centres de tri québécois, Laroche Paquet (2015) affirme que « [...] 44,4 % des centres de tri ayant répondu [...] ont identifié le traitement et la vente du verre comme étant le plus gros problème que vivent actuellement les centres de tri au Québec. » Le tableau 3.7 montre l'évolution de la quantité de verre récupéré vendue à des fins de recyclage.

Tableau 3.7 Évolution des quantités de résidus de verre récupérés vendus aux courtiers, conditionneurs et recycleurs québécois (inspiré de RECYC-QUÉBEC, 2017a, p. 11)

	2010	2012	2015
Quantité de résidus de verre récupérés vendus (tonnes)	94 000	66 000	23 000

Toutefois, de nouvelles technologies sont actuellement à l'essai, notamment dans certains centres de tri. Avec ces technologies, ÉEQ espère obtenir du verre de qualité suffisante pour assurer sa recyclabilité. Ces technologies sont revues à la section 5.2 du présent essai.

3.4 L'apport volontaire

L'apport volontaire, moins populaire au Québec, pourrait se présenter comme une méthode complémentaire aux systèmes étudiés précédemment. Les sous-sections qui suivent présentent d'abord les quelques exemples d'apport volontaire au Québec. Ensuite, l'exemple de la France sera décrit afin de comprendre le potentiel de cette méthode de gestion.

3.4.1 Applications de l'apport volontaire au Québec

L'apport volontaire de résidus recyclables a commencé à la fin des années 1970 au Québec, avant même la collecte sélective de porte à porte (Chamard et Méthot, s. d.). Cependant, cette pratique, demandant

trop d'efforts pour les citoyens peu sensibilisés, a donc été tassée par la collecte de porte à porte. Toutefois, depuis trois ans, l'apport volontaire du verre attire l'intérêt de certaines municipalités, notamment dû au faible taux de recyclage du verre récupéré par la collecte de porte à porte.

Écocentres

Les exemples d'apport volontaire géré par le domaine public au Québec se résument principalement aux écocentres. Ces centres permettent aux citoyens de récupérer certaines matières qui ne sont pas visées par la collecte sélective, par exemple les résidus de CRD, les électroniques, les peintures, la ferraille, etc. Ces centres proposent donc des conteneurs ouverts où les citoyens peuvent y déposer leurs matières triées.

Ce concept est calqué sur le principe des déchèteries en France (Kachanova, 2014). Ces centres d'apport volontaire se comptaient au nombre de 4561 sites en 2011 et leur performance représentait, cette année-là, 33 % de l'ensemble des résidus ménagers recyclables récupérés au pays (ADEME, 2016b).

Au Québec, 260 écocentres publics étaient répertoriés en 2015 (RECYC-QUÉBEC, 2017a). En ce qui a trait au verre, les écocentres acceptent non seulement les contenants de verre creux, mais également les produits de verre plat tels que les miroirs et les fenêtres. Ces derniers ne sont pas acceptés dans la collecte sélective de porte à porte et peuvent donc être récupérés aux écocentres.

Les écocentres, puisqu'ils préconisent le tri des matières, permettent de récupérer un verre peu contaminé. Théoriquement, il pourrait donc être possible de favoriser la récupération du verre par apport volontaire aux écocentres plutôt que par la collecte sélective. Toutefois, avec 211 points de service, les écocentres sont trop rares et dispersés. Ce système demanderait trop de déplacements pour les citoyens : le taux de récupération serait donc très faible (ADEME, 2014). De plus, le verre creux est actuellement mélangé au verre plat. Le verre plat étant plus difficile à recycler, le taux de valorisation d'un tel mélange serait possiblement faible.

Cloches et conteneurs pour les verres creux

Certaines municipalités et municipalités régionales de comté (MRC) québécoises ont choisi de lancer des projets pilotes pour la récupération du verre par apport volontaire. Tous ces projets ont comme avantage de permettre la récupération d'une matière peu contaminée et pouvant être facilement recyclée.

La municipalité estrienne de Saint-Denis-de-Brompton a installé, en février 2015, un conteneur sur l'un de ses terrains municipaux afin de permettre à ses citoyens de récupérer leurs contenants de verre. Ce projet se fait en parallèle avec la collecte pêle-mêle en porte à porte et vise à limiter la contamination du verre par d'autres matières, tout en limitant la contamination des autres matières par le verre dans les centres de tri. Le programme a été initié et mis sur pied par l'Association féminine d'éducation et d'action sociale (AFÉAS), la Fédération de l'âge d'or du Québec (FADOQ) et la municipalité. Un Comité du verre a ensuite été créé afin de s'occuper des efforts de sensibilisation, pour assurer la gestion et la valorisation de la matière récupérée, et pour agir à titre d'ambassadeur du projet. En quelques mois, la municipalité a accepté de lancer le projet pilote qui n'a demandé que peu d'efforts aux niveaux économique et technique. En effet, un conteneur pour matériaux secs et autres gros rebuts a été réaffecté et modifié de façon à encourager la collecte des bouteilles et contenants de verre. (Bureau, 2015, 22 juin ; C. Lemieux, conversation téléphonique, 22 mars 2018 ; Caillou, 2017, 5 septembre) La figure 3.5 montre ce à quoi ressemblait le conteneur avant sa transformation, et ce qu'il est devenu.



Figure 3.5 Conteneur de récupération avant (gauche) et après (droite) sa transformation (tiré de : C. Lemieux, échange de courriels, 23 mars 2018)

Lors d'une entrevue dans le cadre du présent essai avec madame Colette Lemieux, membre du Comité du Verre, le système mis en place est très performant tant en termes de quantité de verre collecté que de qualité. La figure 3.6 présente l'évolution de la quantité de résidus de verre récupérés depuis le début du projet. Le projet, dans les 30 premiers mois, a permis de récupérer environ 100 tonnes de résidus de verre. Considérant une population d'environ 4 000 habitants, ce résultat est non-négligeable. La matière récupérée est collectée par Sani-Estrie, puis achetée à près de 15 \$/tonne par 2M Ressources qui le conditionne avant de le revendre à des recycleurs. Cette collecte, à l'instar de la collecte sélective de porte à porte, est financée par le gouvernement grâce au régime de compensation (RECYC-QUÉBEC, 2017e). De

ce fait, le projet de St-Denis-de-Brompton est exploité à faible coût. De plus, jusqu'à maintenant, le projet n'a pas généré de commentaires négatifs. (Bureau, 2015, 22 juin ; C. Lemieux, conversation téléphonique, 22 mars 2018 ; Caillou, 2017, 5 septembre) Enfin, depuis la décision de la Chine de ne plus importer de matières recyclables, le Comité du verre de la municipalité soutient que plusieurs autres municipalités s'intéressent à leur projet, telles que Saint-Lambert, Weedon, Boucherville et la MRC de Kamouraska (Lemieux, 2018, 28 février).

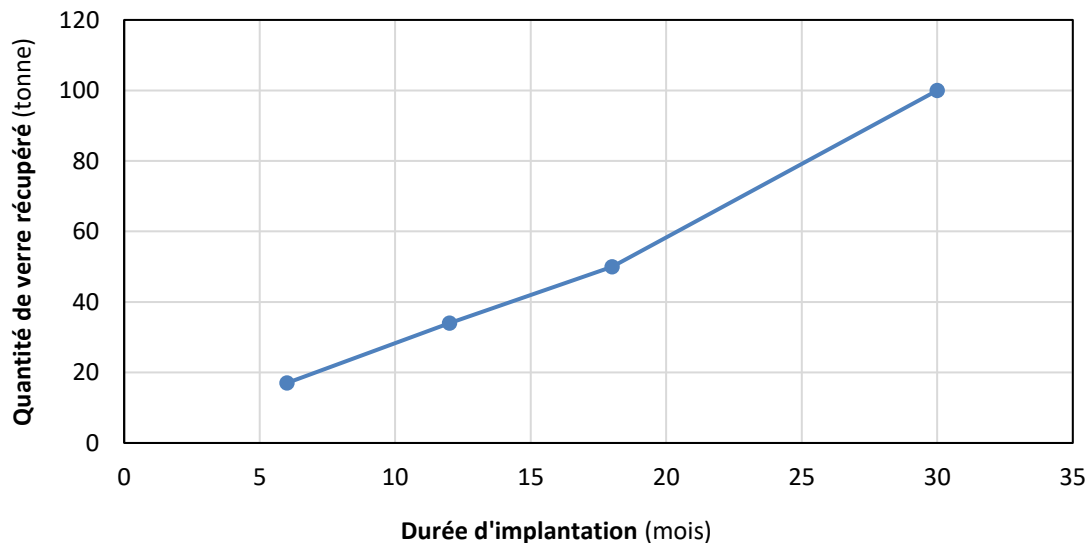


Figure 3.6 Évolution de la récupération de résidus de verre par apport volontaire à Saint-Denis-de-Brompton

La MRC du Val Saint-François, qui chapeaute la municipalité de Saint-Denis-de-Brompton a accepté en juillet 2017, dans le cadre de son PGMR, d'analyser un projet-pilote pour un système de conteneurs de dépôt volontaire du verre couvrant l'ensemble du territoire de la MRC. Ce sont le Comité du Verre de St-Denis-de-Brompton et l'Opération Verre-Vert qui ont, avec l'aide des maires des municipalités, demandé à la MRC de lancer cette étude (C. Lemieux, conversation téléphonique, 22 mars 2018). Selon eux, les citoyens sont déjà sensibilisés aux enjeux environnementaux de la GMR et ils sont prêts à participer à un système d'apport volontaire pour favoriser le tri à la source (GaïaPresse, 2017, 2 octobre ; Lemieux, 2018, 28 février). La firme DeLoitte aurait été mandatée pour cette étude qui devrait être livrée au printemps 2018 (C. Lemieux, conversation téléphonique, 22 mars 2018).

La Ville de Saint-Lambert a également lancé un projet-pilote d'apport volontaire pour les résidus de verre. Ainsi, l'année 2018 verra l'apparition d'un point de dépôt. Ce projet a pour objectif de prouver que les résidents sont prêts à participer plus activement à la GMR. (Desplanques, 2018, 5 février)

Le concept de dépôt volontaire a toutefois son lot de détracteurs. En effet, en 2016, la Ville de Saint-Bruno-de-Montarville souhaitait mettre en place une cloche à récupération de verre à proximité d'une succursale de la SAQ sur son territoire. À la suite de cette annonce, un représentant de l'entreprise de recyclage de verre Verrox énonçait qu'il était préférable de maintenir la récupération des contenants de verre par la collecte sélective de porte à porte. Selon lui, un système d'apport volontaire en parallèle avec la collecte de porte à porte se traduirait par des dépenses en double. Enfin, il affirmait que des solutions existaient pour valoriser le verre issu des centres de tri. (Bélanger, 2016, 1^{er} août) Malgré ces arguments, la Ville a implanté son projet en novembre 2016. Elle aurait amassé, grâce à un conteneur loué et situé derrière l'hôtel de ville, plus de 22 tonnes de contenants en verre en 2017 (L. Charest, échange de courriels, 27 mars 2018). Le projet est actuellement pris en charge par la Direction urbanisme, environnement et développement durable de la Ville, alors que la matière récupérée est achetée à 15 \$/tonne et conditionnée par 2M Ressources. Jusqu'à maintenant, les commentaires reçus de la part des citoyens seraient pour la grande majorité, voire la totalité, positifs. (I. Bérubé, échange de courriels, 26 mars 2018) Le coût annuel du projet, incluant les coûts de location du conteneur et ceux du transport de la matière, s'élève à environ 3 000 \$. (L. Charest, échange de courriels, 27 mars 2018)

3.4.2 Applications de l'apport volontaire en France

Comme vu précédemment, la collecte des résidus de verre par apport volontaire est encore marginale au Québec. Afin d'évaluer les enjeux et le potentiel de cette méthode, il est intéressant d'étudier sa mise en œuvre dans d'autres régions.

Avec l'adoption de sa loi de transition énergétique, la France s'est lancée en 2015 dans la poursuite d'objectifs ambitieux de valorisation des matières résiduelles et de l'énergie (*Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte* ; Observatoire Régional des Déchets d'Île-de-France [ORDIF], 2017). Cette loi encourage les Français à améliorer le taux de recyclage de leurs déchets. Selon Eco-Emballages (2016), l'une des entreprises agréées par l'état français pour gérer le recyclage des emballages ménagers, cette loi « [...] va modifier le paysage de la collecte [...] » De ce fait, la France vise le tri des matières à la source en demandant aux citoyens de séparer leurs résidus recyclables en trois flux : le verre, les papiers et cartons, ainsi que les plastiques et métaux. Ce tri permettrait d'optimiser l'ensemble du cycle de recyclage de la matière. (Eco-Emballages, 2016)

Actuellement, la collecte sélective est divisée en apport volontaire et en collecte de porte à porte. Au cours des prochaines années, la France souhaite harmoniser ses pratiques. Pour ce faire, elle compte

notamment « Intensifier le développement de l’apport volontaire et la séparation des flux [...] », tout en réduisant le porte à porte (Eco-Emballages, 2016). Selon les études françaises, l’apport volontaire serait moins coûteux que la collecte sélective de porte à porte, tout en permettant la récupération d’une matière moins contaminée (ADEME, 2014).

Malgré les études, il semble que le système d’apport volontaire français ne permette pas l’obtention d’une matière aussi pure que le voudraient les recycleurs. En effet, le verre qui en est issu est contaminé par les vitrocéramiques, les verres d’oxyde de plomb, le pyrex, la céramique et même par des bouteilles de plastique et des canettes d’aluminium. De ce fait, les recycleurs doivent se doter de trieurs optiques pour purifier la matière et pour pouvoir l’intégrer dans leurs procédés. (Victoires Editions, 2015, 3 août)

Selon l’ADEME (2014), la clé du succès de l’apport volontaire est la densité des points d’apport volontaire (PAV). Or, ceux-ci sont nombreux en France. En 2015, 183 000 conteneurs étaient dédiés à la récupération du verre, chacun d’entre eux desservant en moyenne 296 habitants (Eco-Emballages, 2016). En zone urbaine, ces conteneurs sont répartis au pied des immeubles d’habitation de façon à ce que les résidents ne ressentent pas le besoin d’utiliser leur voiture pour s’y rendre. En milieu rural, 90 % des citoyens habitent à moins d’un kilomètre d’un PAV. C’est ainsi que 80 % du verre récupéré est collecté par apport volontaire. Une étude, qui tentait d’identifier la quantité de déplacements en voiture imputés à l’apport volontaire, démontre que le verre nécessite 0,04 km/an/ménage pour sa gestion en apport volontaire en France. Cette valeur, plus basse que les déplacements imputés à l’apport volontaire pour les papiers et autres emballages (0,55 km/an/ménage), est expliquée par la densité élevée des PAV pour le verre sur le territoire. (Eco Emballages, 2015)

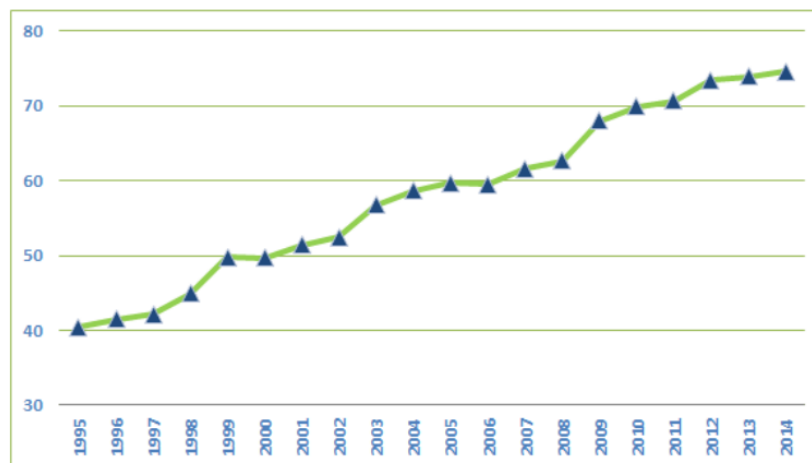


Figure 3.7 Évolution du taux de recyclage du verre en France (tiré de : Friends of Glass et Verre Avenir, 2016, p. 1)

Le système français semble porter ses fruits. En effet, le taux de recyclage des emballages de verre augmente constamment depuis 1995. En 2014, ce taux atteignait 74,6 %. La figure 3.7 montre l'évolution du taux de récupération du verre en France entre 1995 et 2014. (Friends of Glass et Verre Avenir, 2016)

4. DÉBOUCHÉS CONVENTIONNELS DU VERRE RÉCUPÉRÉ

Actuellement, il existe différentes applications pour valoriser le verre récupéré et pour, de cette façon, le détourner des LET. Certains de ces procédés sont déjà utilisés au Québec ou ailleurs dans le monde. Ceux-ci, au contraire de projets toujours en cours de développement ou faisant l'objet de projets-pilotes, sont étudiés dans la présente section.

Certaines de ces applications, fréquemment utilisées au Québec, ont fait l'objet d'une ACV produite par Quantis en 2015. Cette étude analyse quatre projets de commercialisation du verre mixte issu des centres de tri québécois et les compare avec trois scénarios de base :

- l'enfouissement ;
- l'utilisation comme matériau de recouvrement dans les LET ;
- l'utilisation comme matériau de sous-fondation de chemins dans les LET.

L'annexe 5 reprend les détails de chaque scénario de base et des quatre projets de commercialisation, tels qu'établis dans le rapport de Quantis.

La présente section s'intéresse aux différents débouchés conventionnels du verre. Les avantages et enjeux de ces derniers seront analysés afin de définir s'ils sont pertinents d'un point de vue environnemental.

4.1 Matériau de recouvrement dans les lieux d'enfouissement

Selon le *Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles*, les matières résiduelles éliminées dans un LET doivent être recouvertes afin de « [...] limiter le dégagement d'odeurs, la propagation des incendies, la prolifération d'animaux ou d'insectes et l'envol d'éléments légers [...] ». Selon le règlement, chaque journée d'exploitation doit être terminée par le recouvrement des matières enfouies, et ce, à l'aide de sol ou d'un matériau répondant aux critères. Or, le verre récupéré et trié peut répondre à ces critères. Les centres de tri ont donc la possibilité d'envoyer leur verre, insuffisamment décontaminé pour être recyclé, aux LET. Plusieurs des centres de tri québécois ont saisi cette opportunité (Quantis, 2015). Selon Buist et al. (2015), les centres de tri paieraient environ 27 \$/tonne pour ainsi se débarrasser de cette matière problématique. Cette option ne leur permet pas de produire des profits, mais il s'agit tout de même d'une alternative à l'enfouissement économiquement avantageuse.

D'un point de vue environnemental, cette stratégie est plus intéressante que l'enfouissement. D'abord, qu'ils soient enfouis ou utilisés comme matériaux de recouvrement, les résidus de verre occupent le même espace dans les LET et nécessitent le même transport. Toutefois, la valorisation du verre permet de remplacer le sable qui aurait été utilisé comme matériau de recouvrement (Quantis, 2015). Cette technique permet ainsi de réduire les impacts associés à l'extraction, au traitement et au transport du sable. Ces avantages se transposent aussi en avantages économiques pour les LET. Ainsi, une fois sorti des centres de tri, il est plus avantageux de valoriser le verre que de l'enfouir. Enfin, cette technique a comme intérêt de ne pas nécessiter de tri de couleur.

Toutefois, puisqu'il doit passer au travers de différentes étapes de traitement dans les centres de tri, l'enfouissement du verre provenant de ces derniers a un impact plus important que le verre directement envoyé aux ordures chez le consommateur. Pour ce dernier scénario, le transport est également plus direct puisque les résidus de verre n'ont pas à transiter par un centre de tri. Il serait donc intéressant de comparer l'impact du verre directement éliminé avec celui récupéré, trié puis utilisé comme matériel de recouvrement.

En outre, en plus de ne pas respecter les 3RV-E, l'avantage que procure la valorisation des résidus de verre en LET est inférieur aux techniques de recyclage qui seront revues dans certaines des sections qui suivent. Cette stratégie devrait donc être utilisée en dernier ressort.

4.2 Sous-fondation de routes

Semblable à la technique précédente, le verre récupéré et trié peut être utilisé sous forme concassée comme matériau de sous-fondation de routes. Le verre récupéré remplace alors la pierre concassée ou d'autres agrégats. Un projet pilote mené à Sherbrooke a permis d'utiliser un matériau de résidus de verre pur à 97,1 % à cette fin (Lupien, 2006). D'autres entités gouvernementales, telles que le *Minnesota Department of Transportation*, acceptent l'utilisation d'une certaine quantité de verre récupéré concassé dans la fabrication de routes (Minnesota Pollution Control Agency, s. d.).

Cette technique présente les mêmes avantages que l'utilisation du verre comme matériel de recouvrement dans les LET : une diminution des impacts liés à l'extraction, au traitement et au transport de la pierre concassée remplacée par des résidus de verre. Elle présente toutefois les mêmes limites et ne devrait pas être préconisée.

4.3 Nouveaux contenants de verre

L'une des principales méthodes de valorisation du verre creux consiste à réintroduire les résidus de verre dans la production de nouveaux contenants. Comme il a été expliqué dans la section 1.2, cette technique de recyclage est actuellement mise en pratique au Québec par l'usine montréalaise du verrier international Owens-Illinois. Avec une production annuelle de plus de 150 000 tonnes, cette industrie a le potentiel de recycler tout autant de résidus de verre.

4.3.1 Impacts positifs

Il est d'abord intéressant de rappeler qu'au contraire du verre récupéré, la calcination de certaines matières premières (Na_2CO_3 et CaCO_3) lors de la production de verre mène à la génération et à la perte de CO_2 sous forme gazeuse. En fait, une tonne de calcin permet de produire une tonne de nouveau verre. En comparaison, comme il peut être vu au tableau 1.4, une tonne de matières premières permet théoriquement de produire 0,9 tonne de verre. Une tonne de résidus de verre remplace donc 1,1 tonne de matières premières. Considérant que les matières premières et le calcin ont, selon François Carrier d'Owens-Illinois (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018) un prix semblable d'environ 100 \$/tonne, la production de 150 000 tonnes de verre à partir de calcin pourrait signifier des économies de 1,5 million de dollars comme montré au tableau 4.1. De façon plus réaliste, le remplacement de 30 % de matières premières par du calcin signifie une économie de 450 000 \$. Toutefois, cette approximation est basée sur l'estimation que les matières premières coûtent, toutes matières confondues, 100 \$/tonne. Dans les faits, l'économie en termes de matière première ne se fait que sur les carbonates (Na_2CO_3 et CaCO_3), et non pas sur le sable. L'économie réelle est donc basée sur le prix de ces matières, et non sur le prix du sable.

Tableau 4.1 Coût matériel et économique de la fabrication de 150 000 tonnes de contenants de verre à partir de matières premières ou secondaire

Type de verre produit	Masse de verre produit	Ratio matière:produit	Masse de matière nécessaire	Prix de la matière	Coût total de matière
Verre à partir de matières premières	150 000 tonnes	1:0,91	165 000 tonnes	100 \$/tonne	16 500 000 \$
Verre à partir matière secondaire (calcin)		1:1	150 000 tonnes		15 000 000 \$

Ensuite, en réintroduisant environ 20 % et 40 % de calcin dans ses productions respectives de verre clair et de verre ambré, l'usine montréalaise d'Owens-Illinois réussit à abaisser ses émissions de GES. Comme vu à la section 1.2, cette diminution est directement liée à une baisse de la combustion de gaz naturel et

à la réduction des quantités de carbonates calcinés et qui génèrent du CO₂. Cette diminution d'émissions de GES est positive pour l'environnement, mais également pour Owens-Illinois qui est soumis au SPEDE.

L'impact économique positif de l'utilisation du calcin dans la production de nouveaux contenants de verre permet à l'usine montréalaise d'Owens-Illinois de faire face aux verriers asiatiques et aux producteurs de contenants de plastique et d'aluminium. Ces compétiteurs proposent des contenants à faible coût et la pérennité de l'industrie québécoise dépend en partie de sa capacité à diminuer ses frais. (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018)

Cette méthode de valorisation permet de respecter la hiérarchie des 3RV-E préconisée par la *Loi sur la qualité de l'environnement*. En effet, puisque la gestion actuelle des contenants de verre ne permet pas le réemploi, c'est leur recyclage qui doit être mis de l'avant. De plus, l'intégration de contenants de verre récupérés dans la fabrication de nouveaux contenants peut être répétée à l'infini tout en maintenant une qualité de produits identiques. Une telle boucle fermée a donc un impact positif sur l'utilisation des matières premières.

4.3.2 Défis et contraintes

L'aspect négatif principal de l'utilisation de calcin dans la fabrication de nouveaux contenants réside dans le conditionnement de la matière récupérée. En effet, les résidus de verre utilisés dans un tel procédé doivent respecter des spécifications rigoureuses et doivent donc être exempts de tout contaminant. L'annexe 4 donne l'exemple d'une fiche de spécifications que doit respecter le calcin utilisé par l'usine montréalaise d'Owens-Illinois. Actuellement, le verre issu de la collecte sélective au Québec répond très difficilement à ces caractéristiques, ce qui explique la difficulté de l'industrie de s'approvisionner en calcin. (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018)

De plus, les traitements que doivent subir les résidus de verre pour répondre aux spécifications des verriers ont un certain coût environnemental. Selon l'ACV produite par Quantis concernant différents projets de commercialisation du verre récupéré par des centres de tri au Québec, la production de calcin génère environ 7 % plus de GES que l'extraction de l'équivalent de matières premières servant à la production de contenants de verre. Cependant, la réduction d'émission de GES issue de l'intégration de calcin au procédé de fabrication de verre compense très largement cette limite. (Quantis, 2015) Il reste donc pertinent, d'un point de vue environnemental, d'utiliser du calcin dans la production de contenants de verre creux.

Parmi les traitements des résidus de verre, l'utilisation du calcin dans la production de nouveau verre au Québec nécessite un tri optique des couleurs. En effet, un calcin issu de verre clair doit être utilisé dans la fabrication de contenants de verre clair, alors que la production de verre ambré nécessite des résidus de majoritairement ambré (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018). Cette spécification oblige les conditionneurs ou centres de tri à s'équiper de trieurs optiques et à les opérer, générant des impacts environnementaux.

4.3.3 Analyse de cycle de vie

Comme il a été mentionné précédemment, une ACV produite par Quantis permet d'évaluer l'impact environnemental de l'utilisation du verre récupéré dans la production de nouveaux contenants de verre, et ce, en comparaison avec d'autres méthodes de gestion en fin de vie du verre, soit les trois scénarios de base de Quantis. L'annexe 5 détaille le scénario de fabrication de bouteilles de verre à contenu recyclé (4.1) et les trois scénarios de base (1, 2 et 3). Selon les résultats de l'ACV, le scénario de production de contenants de verre à 45 % de contenu recyclé a un impact environnemental inférieur aux autres procédés. En effet, l'étude considère que si le verre est enfoui ou valorisé dans les LET, le calcin n'est alors pas disponible pour la fabrication de bouteilles de verre. Les bouteilles doivent donc être faites à 100 % de matières premières, ce qui correspond à la majorité des impacts environnementaux de l'enfouissement ou de la valorisation du verre récupéré dans les LET. (Quantis, 2015)

Les bénéfices liés au scénario de recyclage sont toutefois relativement faibles. Par exemple, tel que vu dans la figure 4.1, l'impact sur les CC de la production de bouteilles de verre à 45 % de contenu recyclé serait de seulement 18 % inférieure au scénario d'enfouissement des résidus de verre.

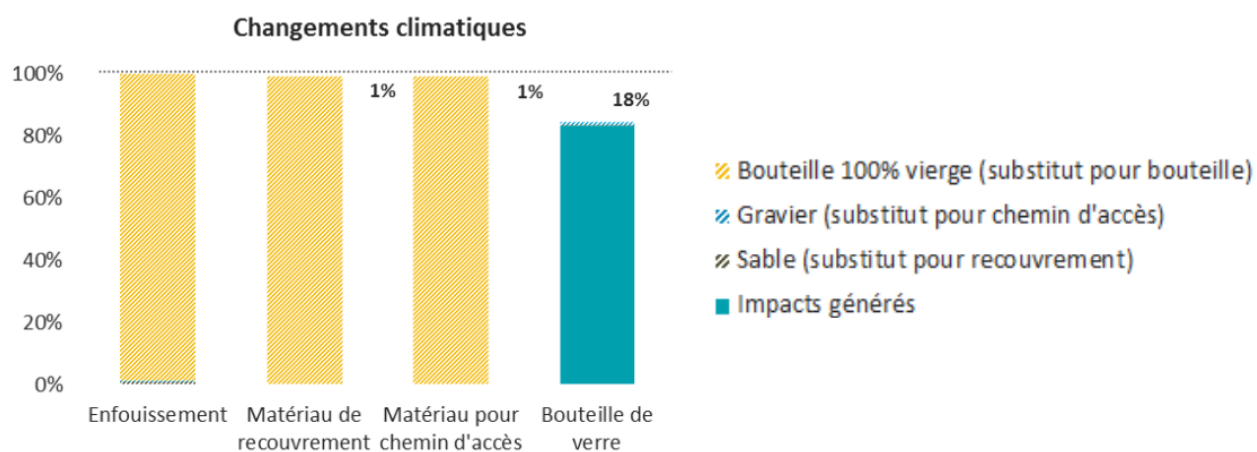


Figure 4.1 Comparaison de l'impact sur les changements climatiques de différents scénarios de valorisation des résidus de verre issus des centres de tri au Québec (inspiré de Quantis, 2015, p. 37)

Limites de l'étude

En plus de celles déjà mentionnées dans le rapport de Quantis, l'ACV présente certaines limites en lien avec les projets présentés ici. Premièrement, dans le cas de la production de contenants de verre, Owens-Illinois n'utilise pas de verre récupéré mixte. Or l'ACV de Quantis étudie des projets utilisant cette matière. Elle n'est donc pas applicable à la réalité actuelle québécoise. Quantis relève déjà cette limite et stipule que son analyse se base sur une nouvelle ligne fictive de production de verre à partir de verre mixte (Quantis, 2015). Un tel scénario devrait avoir un impact environnemental moindre que celui utilisant du calcin non mixte. En effet, le tri optique des couleurs de verre nécessite une quantité d'énergie non nulle. Ce conditionnement est toutefois négligeable comparativement aux émissions de GES évitées par l'utilisation de calcin trié par couleur dans la fabrication de nouveaux contenants de verre.

Ensuite, comme vu à l'annexe 5, il est important de remarquer que le scénario de fabrication de bouteilles à partir de 45 % de calcin inclut l'impact environnemental des 55 % de matières premières également utilisées dans le procédé. Cette considération est une limite importante de ce scénario puisqu'elle empêche de bien saisir l'avantage réel de la substitution des matières premières par du calcin dans la production de contenants en verre. La figure 4.2 tente de corriger cette limite en comparant les impacts sur les CC de l'enfouissement et d'un scénario de production d'une bouteille de verre contenant 45 % de calcin, mais dont seule la portion de verre récupérée est considérée. Le tableau 4.2 reprend les paramètres des scénarios comparés selon Quantis et selon le scénario modifié. Pour parvenir à ces résultats, une approximation a été faite : les contributions du gravier et du sable ont été ignorées puisqu'elles semblent très peu significatives (1 % chaque). Ensuite, il est possible d'affirmer que les matières premières (55 % du produit) utilisées pour fabriquer la bouteille à contenu recyclé ont le même impact que 55 % des matières premières utilisées pour fabriquer la bouteille complètement vierge du scénario d'enfouissement. Il est donc possible de retrancher 55 % de l'impact du scénario d'enfouissement, et exactement la même quantité du scénario de bouteille à contenu partiellement recyclé. L'impact restant permet donc de comparer l'impact des 45 % de calcin avec les 45 % de matières premières restantes pour le scénario d'enfouissement.

Tableau 4.2 Modification des paramètres des scénarios de l'étude de Quantis afin de ne considérer que la production de verre à partir de calcin (inspiré de Quantis, 2015, p. 13)

Scénarios		Unité fonctionnelle associée à la fonction secondaire	Produits générés	Produit évité
N°1	Enfouissement	S.O.		
N°4.1	Production d'une bouteille de verre avec contenu recyclé (selon Quantis)	Produire une bouteille de verre de 2,14 kg	Une bouteille de verre de 2,14 kg avec un contenu recyclé moyen de 45 % (équivalant à 0,965 kg de calcin et 1,18 kg de verre vierge) Taux de rejets à l'étape de conditionnement : 3,5 %	Une bouteille de verre de 2,14 kg avec un contenu 100 % vierge
N°4.1'	Utilisation du calcin dans la production d'une bouteille de verre avec contenu recyclé (modifié)	Utiliser 0,965 kg de calcin dans la production d'une bouteille de verre de 2,14 kg	0,965 kg (45 %) d'une bouteille de verre de 2,14 kg dont les 65 autres % sont du verre vierge. Taux de rejets à l'étape de conditionnement : 3,5 %	0,965 kg de verre vierge

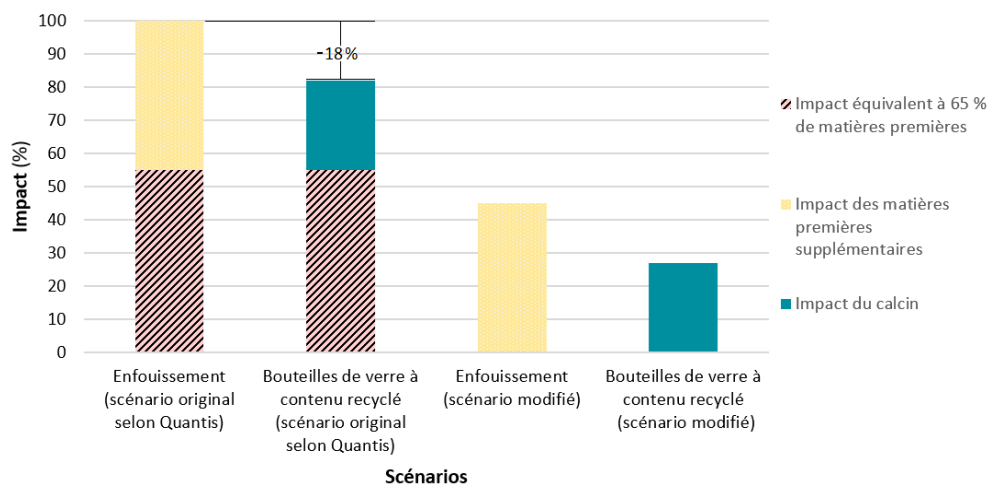


Figure 4.2 Ajustement du scénario étudié par Quantis afin de ne considérer que l'impact de la production de verre à partir de calcin sur les changements climatiques

Les résultats des scénarios modifiés peuvent ensuite être rapportés de sorte que l'enfouissement ait une valeur de 100 %, et ce, afin de le comparer de façon absolue avec la production de verre neuf à partir de calcin. La figure 4.3 reprend ces résultats. L'utilisation de verre récupéré pour produire des contenants de verre neufs a donc un impact 40 % plus faible que son enfouissement en LET sur l'indicateur CC. En d'autres mots, ce projet générerait 40 % moins de GES que l'enfouissement du verre.

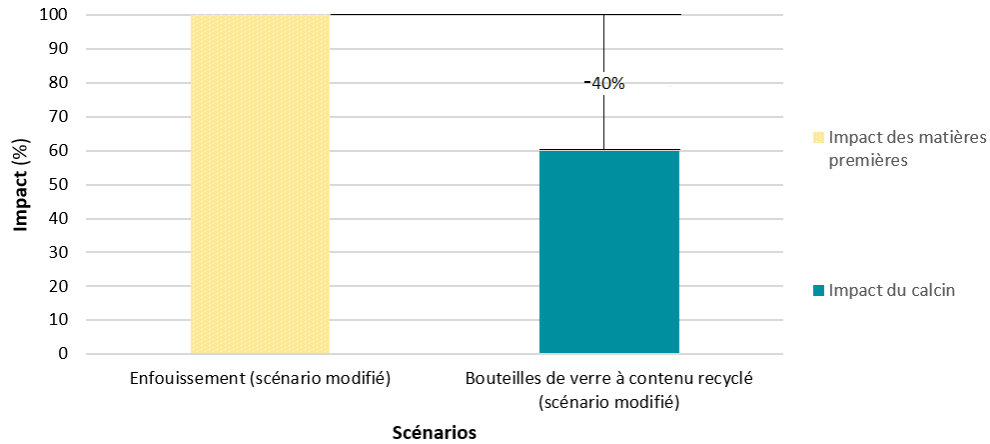


Figure 4.3 Scénarios ajustés afin de ne considérer que l’impact de la production de verre à partir de calcin sur les changements climatiques

Une autre limite de l’ACV de Quantis réside dans le transport des résidus de verre récupérés jusqu’à un conditionneur, puis jusqu’au verrier. En effet, l’étude ne mentionne pas la provenance du calcin utilisé par Owens-Illinois. Or, dans ses calculs, la firme utilise une distance de 37 km entre le conditionneur et le recycleur (Quantis, 2015). Dans les faits, une certaine quantité du calcin utilisé par le verrier provient de 2M Ressources, situé à environ 36 km, ce qui respecte la valeur de Quantis. Cependant, Owens-Illinois affirme qu’une partie de son calcin provient de l’Ontario, du Nouveau-Brunswick et même parfois du Vermont ou de l’état de New York. (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018) Ces endroits sont situés bien au-delà de 37 km de l’usine de Montréal et l’impact du transport est donc sous-estimé pour le scénario de production de bouteille de verre à contenu recyclé. Toutefois, comme vu à la figure 4.4, même en considérant le transport entre les centres de tri et les conditionneurs (350 km), l’impact du transport dans l’ACV est faible (Quantis, 2015). Ainsi, malgré l’importation de calcin des endroits cités précédemment, le recyclage du verre dans de nouveaux contenants devrait avoir un impact inférieur à l’enfouissement. En fait, Quantis soutient, dans sa propre analyse des limites de son étude, que la tendance s’inverse à une distance d’environ 2 200 km entre le conditionneur et le recycleur (Quantis, 2015). L’importation reste donc bénéfique. Enfin, l’impact du transport ne semble pas considérer le retour des camions à leur point d’origine. Il serait intéressant de savoir si les camions profitent de leurs retours pour transporter d’autres matières ou s’ils effectuent leurs retours avec des remorques vides. Dans le premier cas, le retour ne doit pas être inclus dans l’ACV. Dans le deuxième cas, le déplacement de retour devrait être impliqué.

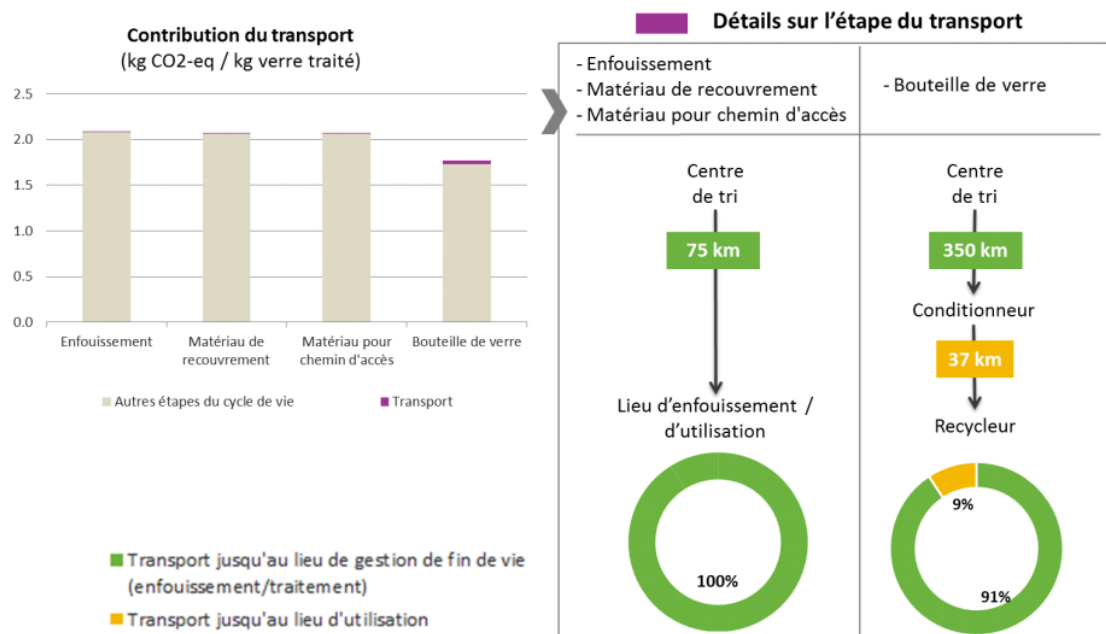


Figure 4.4 Contribution du transport dans l'indicateur changements climatiques pour les scénarios étudiés par Quantis (tiré de Quantis, 2015, p. 38)

La dernière limite identifiée pour le scénario de recyclage du verre en nouvelle bouteille est la perte de matière lors de la production de bouteilles à partir de matières premières. En effet, l'étude semble établir que, lors de la fabrication d'une bouteille de 2,14 kg contenant 45 % de contenu recyclé, les 55 % de verre vierge (1,18 kg) proviennent de 1,18 kg de matières premières. Or, on sait que, lors de la calcination des carbonates, du CO₂ est perdu et qu'il faut donc 1,1 tonne de matières premières pour produire une tonne de verre. L'impact de la production de verre vierge pourrait donc être 10 % supérieur à ce que considérait Quantis. La figure 4.5 démontre l'incidence de cette modification sur la comparaison entre le scénario d'enfouissement et celui de production de bouteilles à contenu recyclé. Cette hypothèse devrait toutefois être vérifiée auprès de la firme pour s'assurer de cette omission.

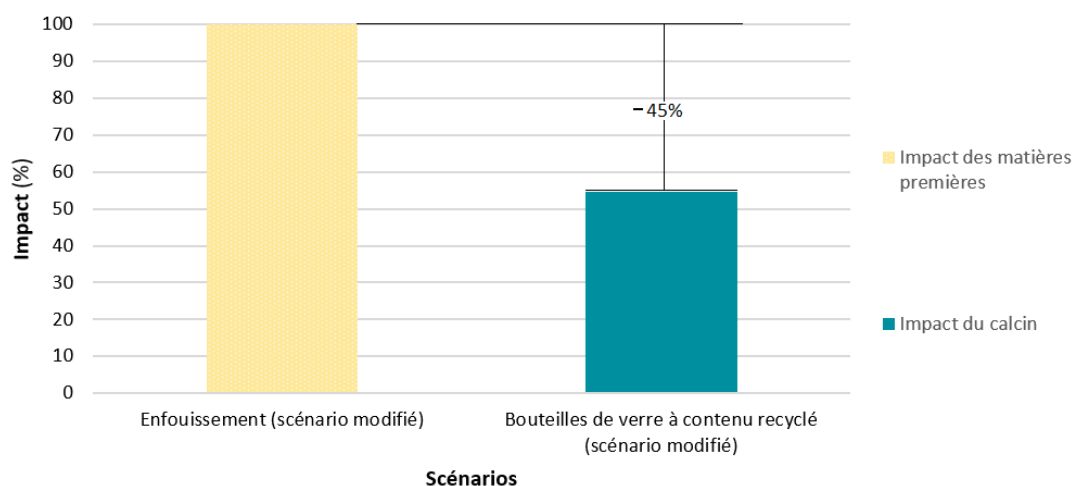


Figure 4.5 Ajustement des scénarios en considérant les pertes de matières premières lors de la calcination des carbonates

Pour conclure, l'ACV conduite par Quantis, malgré quelques limites, démontre l'intérêt environnemental de recycler le verre dans un procédé de fabrication de contenants de verre. Il en ressort que l'enfouissement et la valorisation des résidus de verre dans les LET ont des impacts environnementaux supérieurs à un tel projet de recyclage de verre. De plus, l'utilisation de calcin revêt une importance économique pour la compétitivité de l'usine montréalaise du verrier Owens-Illinois. La technologie actuellement utilisée au Québec permet efficacement de produire un calcin de bonne qualité à partir, principalement, de bouteilles de verre récupérées par les consignes publiques québécoise, ontarienne et néo-brunswickoise. Toutefois, il est difficile pour l'instant de fournir le verrier à partir du verre qui transite par les centres de tri, celui-ci étant trop contaminé. Les différentes parties prenantes de la gestion des résidus de verre au Québec espèrent toutefois régler la situation prochainement. Il est néanmoins trop tôt pour affirmer ou non que les centres de tri réussiront à produire un verre conditionné suffisamment pur pour être utilisé comme calcin, et ce, à partir du verre récupéré par la collecte sélective de porte à porte.

Autres produits de verre

Les résidus de verre peuvent également être utilisés dans d'autres industries de fabrication de verre. Par exemple, l'entreprise wisconsinoise Eco-Friendly Flooring fabrique des tuiles pour la décoration intérieure faites à 100 % de verre recyclé (Eco-Friendly Flooring, 2018b). Le conditionnement des résidus de verre s'apparente aux traitements considérés dans l'ACV de Quantis. Cependant, la comparaison de ce produit avec l'analyse de l'impact de la production de bouteilles de verre à partir de calcin se limite au conditionnement. En effet, les tuiles de verre produites par l'entreprise remplacent l'utilisation de différents matériaux : tuiles de céramique, granit, mélamine, béton, stratifié, bois, vinyle, etc. Il est donc

difficile d'effectuer une ACV sur un tel produit et de se prononcer sur ses avantages réels. Enfin, aucune entreprise québécoise ne semble s'intéresser à un tel procédé, ce qui diminue son intérêt pour le présent essai. Cependant, ce projet permet de respecter la hiérarchie des 3RV-E et pourrait présenter certains avantages environnementaux. La figure 4.6 montre l'un de ces produits.



Figure 4.6 Exemple de tuiles de verre recyclé de l'entreprise Eco-Friendly Flooring (tiré de Eco-Friendly Flooring, 2018a)

4.4 Verre de filtration

Sans que cette technique soit considérée dans l'ACV de Quantis, le verre récupéré peut être utilisé comme matériau filtrant dans des systèmes de filtration, notamment pour les piscines résidentielles. Le sable de verre peut ainsi remplacer le sable et des matières filtrantes moins répandues, soit les zéolites et la terre de diatomée. (Dryden Aqua, 2017; ECOsmarte Planet Friendly, Inc., 2017 ; ÉEQ, s. d. ; Webb, 2009, Avril) Selon ÉEQ (s. d.), le marché des matériaux de filtration de piscine représente 45 000 tonnes pour le nord-est de l'Amérique du Nord.

D'un point de vue technique, les fournisseurs de sable de verre comme matériau de filtration vantent le fait qu'il ne s'agglomère pas au fil du temps, au contraire du sable habituellement utilisé. Cet aspect apporterait plusieurs bienfaits. D'abord, un système au verre maintient son efficacité plus longtemps et a une durée de vie d'au moins neuf ans, soit trois fois plus long que le sable. Ensuite, les filtres au verre nécessiteraient des rinçages (*backwash*) 75 % moins fréquents que ceux au sable et 50 % moins fréquents que ceux à la terre de diatomée. De plus, ces rinçages nécessiteraient moins d'eau puisque les contaminants sont retirés plus facilement (Dryden Aqua, 2017; ECOsmarte Planet Friendly, Inc., 2017 ;

ÉEQ, s. d. ; Webb, 2009, Avril). Ensuite, le sable de verre préviendrait mieux la formation de biofilms, ce qui réduit l'entretien nécessaire (ÉEQ, s. d.).

Au niveau environnemental, la filtration au verre permet d'importantes économies d'eau potable dû à une réduction des fréquences de rinçage du filtre. De plus, le produit remplace une matière première et permet de recycler le verre post-consommation. Mieux encore, sa durée de vie est plus longue que le sable conventionnellement utilisé. Évitant le remplacement du filtre, cette technologie permet donc une réduction à la source. Enfin, en fin de vie, le filtre de verre peut être recyclé à nouveau.

Une ACV a été préparée pour le compte de *British Glass* concernant différents scénarios de recyclage du verre. Selon l'étude de *Enviros Consulting Ltd* (2003), l'utilisation du verre récupéré dans les filtres à eau générerait environ trois fois plus de GES que le sable. Cependant, l'ACV ne semble pas considérer la durée de vie supérieure du filtre de verre. Or, Webb (2009, avril) rapporte que, selon Josh Peterson de l'entreprise *ECOsarte*, le verre filtrant a une durée de vie de plus de neuf ans, soit plus du triple des filtres au sable. De plus, *Enviros Consulting Ltd* (2003) relève que son étude ne prend pas en compte la réduction potentielle de consommation d'énergie liée à l'activité de la pompe. En effet, la pompe doit travailler moins fort puisque le verre ne cause pas de bouchons d'agglomérat, et qu'il nécessite moins de rinçages. Cette ACV est également limitée car elle a été produite il y a 15 ans et parce qu'elle ne considère que les émissions de GES. Enfin, elle a été produite au Royaume-Uni et sa portée est donc réduite au Québec puisque le profil énergétique québécois est unique grâce à son hydroélectricité.

4.5 Sablage au jet de verre

Le sablage au jet de verre est une alternative au sablage au jet de sable conventionnel. Cette application de recyclage permet de remplacer une matière première, soit le sable. Toutefois, son intérêt d'un point de vue environnemental est limité puisqu'il ne permet pas d'économie d'eau substantielle comme dans le cas du verre de filtration, ni de réduction d'émissions de GES comme pour le calcin dans la production de contenants de verre. Ensuite, au contraire de son utilisation comme matériau de recouvrement, le verre recyclé dans le sablage au jet ne permet pas la même réduction de déplacements en comparaison avec un scénario d'enfouissement. Enfin, il n'est pas nécessairement possible de le récupérer après utilisation.

Cependant, le sablage au jet de verre a un avantage au niveau de la santé. En effet, cette technique est reconnue comme étant plus saine pour les travailleurs puisque le SiO_2 présent dans le verre est sous forme amorphe, au contraire de la silice cristalline présente dans les autres matériaux comme le sable. Elle est

donc inerte et peut être utilisée sans danger, notamment près de l'eau. (ESCA Industries, Ltd, s. d. ; GlassBlast, s. d.) Enfin, il n'est pas nécessaire de trier le verre par couleur pour cette application.

4.6 Laine de verre

La laine de verre est un isolant thermique fibreux, utilisé entre autres dans les bâtiments. La composition et le procédé de fabrication de ce produit partagent plusieurs points en commun avec la production de contenants de verre. Les ingrédients, sans considérer les additifs potentiels, sont le sable, le Na_2CO_3 ainsi que le CaCO_3 . Ces matières peuvent être remplacées par du calcin, et ce, sans altérer la qualité du produit fini. Ensuite, dans les deux procédés, les matières doivent être fondues entre 1 300 et 1 500 °C pour la fabrication de laine de verre. Dans les deux cas, l'ajout de calcin permet de diminuer la température de fusion et d'éviter la calcination des carbonates et le rejet de CO_2 . (European insulation Manufacturers Association [Eurima], s. d.)

L'utilisation de verre récupéré dans la production de laine de verre offre donc des avantages comparables à ceux de l'industrie du verre creux. C'est pourquoi les fabricants de matériaux isolants souhaitent utiliser le plus de calcin possible dans leurs procédés. Selon la *North American Insulation Manufacturers Association* (NAIMA) (2016), les usines états-uniennes avaient utilisé plus de 1,7 milliard de livres de verre récupéré en 2014. En Europe, les producteurs utilisent jusqu'à 85 % de résidus de verre creux et de verre plat selon Eurima (s. d.). Actuellement, aucune usine de production de laine de verre n'existe au Québec. Enfin, cette technologie, comparativement à la production de contenants de verre au Québec, a comme avantage de ne pas nécessiter de tri de couleur.

L'ACV environnementale de Quantis (2015) confirme l'intérêt d'utiliser le calcin dans la production de laine de verre d'un point de vue environnemental. Comme prévu selon les arguments énoncés ci-dessus, l'impact environnemental d'un tel scénario est semblable à celui de la production de contenants de verre creux à partir de calcin. Les résultats ne sont toutefois pas identiques dû à quelques différences dans les scénarios. Le tableau 4.3 relève quelques-unes d'entre elles. Certaines de ces différences sont issues du fait que la laine de verre est fabriquée aux États-Unis. Par exemple, le transport du calcin vers des usines étrangères génère une grande quantité de GES.

Tableau 4.3 Différences entre les scénarios de Quantis pour la production de bouteilles de verre ou de laine de verre à partir de calcin

	Scénario 4.1 : bouteilles de verre	Scénario 4.2 : laine de verre
Transport du conditionneur au recycleur	37 km	550 km
Électricité	Hydroélectricité	Issue de la combustion de combustibles fossiles
Utilisation de calcin comme matière secondaire	45 %	50 %
Procédé de fabrication	Diverses différences à la suite de la fusion de la matière	

Le tableau 4.3 rappelle également que l'utilisation de combustibles fossiles comme source d'énergie au sein d'un procédé industriel génère davantage de GES que l'hydroélectricité. Toutefois, peu importe la provenance du calcin, les usines existantes continueront leur production. Cette source d'émission de GES ne doit donc pas influencer l'impact environnemental de cette solution de recyclage des résidus de verre. Ensuite, en comparant la production de bouteilles de verre au Québec et la production de laine de verre aux États-Unis, le Québec a un avantage environnemental grâce à son hydroélectricité. Toutefois, le calcin permet de diminuer l'utilisation d'énergie. Il est donc plus intéressant de diminuer la quantité d'énergie utilisée aux États-Unis qu'au Québec. En effet, réduire la quantité d'hydroélectricité utilisée a moins d'impact que de réduire la quantité de combustibles fossiles brûlés. Ensuite, les procédés de laine de verre utilisent plus de calcin. Cependant, cet argument ne devrait pas être considéré puisque la quantité absolue en tonnes de calcin généré au Québec est la même pour l'un ou l'autre des scénarios. En effet, chacun des scénarios est limité par l'offre de calcin au Québec.

Enfin, selon les résultats de Quantis (2015), l'utilisation du verre récupéré au Québec pour la production de laine de verre aux États-Unis est moins intéressante que l'utilisation du même verre dans la production de bouteilles de verre au Québec. Il serait donc préférable de favoriser l'utilisation du calcin au Québec, plutôt qu'aux États-Unis.

5. INNOVATIONS DANS LA VALORISATION DU VERRE

Alors que les résidus de verre peuvent déjà être recyclés dans divers procédés et produits conventionnels, certains d'entre eux, étudiés dans la section précédente, ont un avantage environnemental limité. Afin de stimuler les efforts de récupération et de recyclage du verre au Québec, il est important de présenter des débouchés à valeur ajoutée pour les résidus de verre.

La présente section se penche sur les avenues possibles dans la recherche de débouchés à valeur ajoutée du verre. D'abord, le traitement des résidus de verre en vue de leur recyclage sera abordé. De ceci découlera une sous-section sur l'innovation en matière de conditionnement du verre. En effet, certains procédés pourraient permettre d'améliorer les propriétés du verre récupéré. Le développement de ces pratiques est nécessaire dans la valorisation optimale du verre. Enfin, les nouveaux débouchés du verre seront analysés afin d'en faire ressortir l'avantage environnemental.

5.1 Traitement et conditionnement traditionnels des résidus de verre

Qu'ils soient triés par les centres de tri ou récupérés par la consigne, les résidus de verre doivent être traités avant de pouvoir être recyclés. Ce traitement vise à retirer les contaminants qui pourraient nuire aux propriétés du verre comme matière première. Les recycleurs de verre demandent un verre décontaminé, tel que le montre, à l'annexe 4, la fiche de spécifications du verrier Owens-Illinois. De plus, le traitement des résidus de verre peut servir à homogénéiser le produit fini afin d'en faciliter la vente.

Selon 2M Ressources et ÉEQ, les traitements auxquels est soumis le verre incluent du tamisage, du concassage et du broyage, de la déshumidification, de l'aspiration ainsi que des tris manuels, optiques et par courants de Foucault (ÉEQ, 2018b ; Quantis, 2015).

D'abord, un tri manuel permet de retirer les objets potentiellement problématiques au traitement du verre. Le concassage permet ensuite d'uniformiser la matière à traiter (Corbitt, 1990). Cette étape permet également de casser les bouteilles pour libérer des matériaux tels que les goulots d'aluminium ainsi que les bouchons métalliques ou de liège. L'aspiration, pour sa part, retire les matériaux moins lourds tels que le papier et certains plastiques. Pour continuer, les résidus métalliques sont retirés par des aimants et autres courants de Foucault. Les métaux ferreux ont des propriétés magnétiques et sont donc attirés vers des aimants. L'aluminium, non magnétique, est plutôt retiré en étant repoussé par induction (Corbitt, 1990). Ensuite, un tri optique permet de retirer des contaminants tels que la porcelaine. Un tel tri peut

également permettre de séparer le verre en différentes couleurs. (Corbitt, 1990 ; Quantis, 2015) Enfin, le broyage permet d'offrir des résidus de verre dans le format désiré (Quantis, 2015).

Les traitements précédemment décrits peuvent suffire à certains procédés de recyclage. Toutefois, d'autres opérations peuvent être nécessaires afin d'améliorer la pureté ou les caractéristiques du verre. Les conditionneurs doivent répondre aux besoins des recycleurs et de leurs procédés de recyclage en adaptant leurs procédés. Des étapes de conditionnement moins communes seront présentées à la section 5.2.

Malgré les traitements actuellement appliqués aux résidus de verre dans les centres de tri, la pureté obtenue pour cette matière ne suffit pas à son recyclage. De ce fait, seuls 14 % des résidus de verre générés au Québec en 2015 ont été recyclés (RECYC-QUÉBEC, 2017a).

5.2 Innovations en matière de conditionnement des résidus de verre

Dans le but de développer un marché pour les résidus de verre, il est primordial d'améliorer la qualité et les propriétés de cette matière secondaire. C'est dans cet espoir que l'organisme sans but lucratif ÉEQ a annoncé, au début de l'année 2016, son plan Verre l'innovation. Considérant le faible taux de recyclage du verre récupéré par la collecte sélective au Québec, ce plan a d'abord comme objectif d'aider les centres de tri à améliorer la qualité des résidus de verre qu'ils produisent. Pour ce faire, ÉEQ a étudié différentes technologies qui pourraient aider le Québec à améliorer le sort de cette matière. (ÉEQ, 2016)

D'autres entreprises, pour leur part, ont tenté d'améliorer les propriétés des résidus de verre récupérés. La micronisation est un procédé permettant d'élargir la gamme d'applications de cette matière secondaire.

5.2.1 Implosion du verre

Les centres de tri sont capables de séparer le verre de plusieurs autres matériaux, mais certains contaminants sont difficiles à retirer. Parmi ceux-ci, les céramiques et porcelaines peuvent créer des problèmes dans des procédés industriels tels que la fabrication de verre creux à partir de calcin. D'autres contaminants du verre peuvent être les étiquettes des contenants et les bouchons des bouteilles (Machinex, 2017).

La technologie d'implosion du verre permet de séparer le verre de plusieurs contaminants en réduisant la taille du verre afin de le tamiser. Au contraire d'un broyeur qui écraserait toutes les matières en plus petites parcelles, l'implosion permet de viser le verre de façon sélective. L'entreprise britannique *Krysteline Technologies* s'est intéressée à cette technologie et a développé des appareils capables de produire des ondes de choc. Ces dernières permettent de réduire la taille des morceaux de verre, laissant les autres matériaux intacts. Le mélange qui en résulte peut ensuite être tamisé afin de recueillir majoritairement du verre. Enfin, l'implosion permet d'obtenir un verre non coupant, assurant un procédé sécuritaire, et ce à partir de verre creux, de verre plat et de mélanges issus des centres de tri. (Krysteline Group Ltd, 2018 ; Machinex, 2017)

Dans le cadre de son plan Verre l'innovation, ÉEQ s'est intéressé à la technologie *Krysteline* et l'a implanté, avec l'aide de l'équipementier québécois Machinex, dans cinq centres de tri. L'annexe 6 montre l'emplacement de ces centres de tri. Ces usines ont actuellement pour but de tester cette technologie durant 15 mois afin de démontrer son utilité et de perfectionner le tri du verre. (ÉEQ, 2018b)

Selon Machinex (2018a, 2018c), les centres de tri pourraient atteindre, grâce à ces technologies, des taux de pureté allant jusqu'à 95 % pour les résidus de verre grossier, et jusqu'à 99 % pour le verre fin. Ces taux pourraient même monter à 97 % et 99,8 % respectivement (Machinex, 2018b).

5.2.2 Micronisation du verre

La micronisation du verre consiste à diminuer la taille des résidus de verre jusqu'à l'obtention d'une poudre de particules ayant un diamètre de l'ordre des micromètres. Les matériaux micronisés détiennent des caractéristiques uniques, notamment par l'augmentation de leur surface spécifique et, conséquemment, de leur réactivité. Le verre ne fait pas exception à cette réalité. La micronisation rend accessibles de nouveaux débouchés de recyclage du verre tel que vu aux sections 5.3.1 et 5.3.2.

Certains débouchés à valeur ajoutée du verre récupéré nécessitent une micronisation très fine. Cependant, les centres de tri sont incapables de produire de la PVM. La technologie est toutefois existante. Selon Toker et al. (2018), les broyeurs à boulets permettent de broyer des morceaux de verre de 25 mm et moins en poudre de 10 µm. Cette technologie consiste en un cylindre dans lequel des boulets, faits d'un matériel dur tel que la céramique, la zircone, d'acier, etc., sont libres de mouvement et sont mélangés au matériel devant être micronisé. La rotation du cylindre entraîne le mouvement des boulets qui s'entrechoquent et qui fracassent le matériel à microniser. La figure 5.1 présente le schéma d'un broyeur

à boulets. (Loh, Samanta et Heng, 2015) Une telle technologie, appliquée à un contexte industriel tel que le conditionnement du verre, coûterait entre 1,2 et 1,7 million de dollars à l'achat, et entre 120 000 et 290 000 \$ à opérer annuellement sur une base de 4 500 heures par année (Tucker et al., 2018).

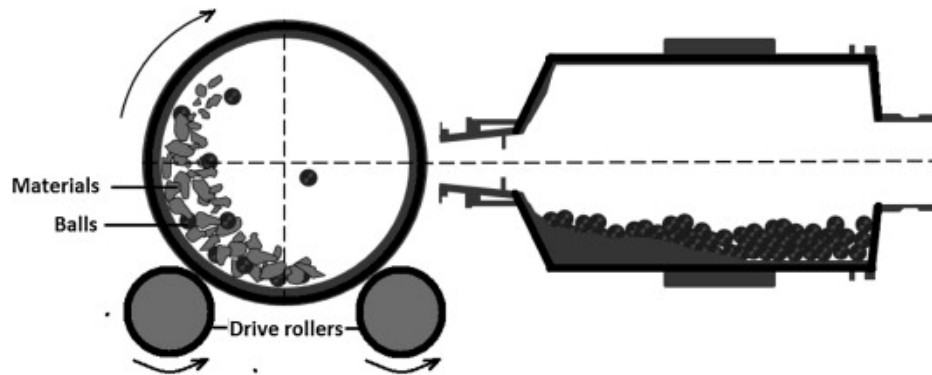


Figure 5.1 Schéma d'un broyeur à boulets (tiré de Loh, Samanta et Heng, 2015, p. 264)

Au Québec, deux usines de micronisation de verre produisent actuellement de la PVM. Tricentris détient l'une d'entre elles et produit la poudre Verrox (Tricentris, s. d.). Les Produits Verglass Inc. possèdent la seconde et produisent la PVM Miraglass (Verglass, s. d.).

5.3 Nouveaux débouchés à valeur ajoutée pour le verre récupéré

Dans le but d'offrir des débouchés à valeur ajoutée plus élevée pour la valorisation des résidus de verre, certains groupes de recherche et entreprises se sont intéressés à des applications moins conventionnelles pour ce matériau. La présente section étudie certains projets de commercialisation de résidus de verre et tente d'identifier s'ils présentent un avantage environnemental.

5.3.1 Le verre comme ajout cimentaire dans les bétons

En 2004, la SAQ a commencé à financer la recherche et développement en lien avec la valorisation du verre dans les matériaux. Au cours de 10 ans de recherches financées par la Chaire SAQ de valorisation du verre dans les matériaux, le professeur Arezki Tagnit-Hamou de l'Université de Sherbrooke et son équipe ont étudié l'utilisation de la poudre micronisée de verre recyclé dans le béton et les autres matériaux cimentaires. (SAQ, 2018 ; Université de Sherbrooke, s. d.) Les chercheurs souhaitent ainsi présenter la poudre de verre micronisée (PVM) comme un ajout cimentaire, au même titre que les cendres volantes, la fumée de silice, les laitiers de haut-fourneau (LHF) et les pouzzolanes naturelles.

Réaction pouzzolanique

Pour mieux saisir l'intérêt d'ajouter des ajouts cimentaires, il est nécessaire de comprendre ce qu'est le ciment. Le ciment classique, appelé ciment Portland, est principalement composé de clinker broyé. Le clinker est un mélange issu du broyage et de la cuisson de calcaire et d'argile dans des proportions de 4 : 1 (LafargeHolcim France, 2018). C'est à cette étape que se produit la calcination du CaCO_3 issu du calcaire, produisant du CaO et du CO_2 . L'argile, pour sa part, est formée de silicates et d'aluminosilicates qui, lors de la clinkérisation, forment du SiO_2 et du Al_2O_3 . Enfin, la cuisson de ces composés permet une réaction entre le CaO et le SiO_2 , formant des silicates de calcium. Lors de l'ajout d'eau au ciment, ce sont ces silicates de calcium qui forment les silicates de calcium hydratés (C-S-H), responsables des propriétés du ciment. Or, l'ajout d'eau au ciment permet également la formation de cristaux d'hydroxyde de calcium $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, une molécule n'ayant aucune propriété cimentaire. (Hermann, 1995 ; LafargeHolcim France, 2018)

L'intérêt de l'utilisation de la PVM dans le béton provient de ses propriétés pouzzolaniques. Les pouzzolanes sont des matériaux qui présentent des propriétés pouzzolaniques, c'est-à-dire qu'elles réagissent avec le $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en présence d'eau pour former le C-S-H. Pour permettre cette réaction, les pouzzolanes doivent contenir du silicium ou des aluminosilicates, majoritairement sous forme de SiO_2 . Le C-S-H ainsi formé est équivalent à celui produit lors de la réaction entre le ciment et l'eau et qui donne ses propriétés au ciment. (Hermann, 1995; Lafarge, 2018; Monaghan, 2017; Tashima, Soriano, Pay) Les ajouts cimentaires de type pouzzolanique permettent ainsi de diminuer la quantité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ présent dans le matériau cimentaire, tout en augmentant la quantité de C-S-H. Ces ajouts permettent également d'améliorer certaines qualités d'un béton dans lequel ils sont utilisés.

Types d'ajouts cimentaires

Les pouzzolanes sont utilisées dans les matériaux cimentaires depuis au moins l'époque de l'Empire romain. Certains bâtiments romains encore présents aujourd'hui auraient en effet été construits à partir de matériaux contenant des pouzzolanes naturelles ou artificielles, telles que des pierres volcaniques ou de l'argile kaolinitique calcinée. L'utilisation de ces matériaux aurait ensuite cessé après la fin de l'Empire romain. (Institut Géopolymère, 2018)

Les LHF ont été utilisés dans les matériaux cimentaires tels que les mortiers dès les années 1700. Leur commercialisation aurait commencé dans les années 1860 pour leur utilisation dans les ciments. (Lewis, 1981; Slag Cement Association, 2018a) Le LHF est un sous-produit de l'industrie du fer et de l'acier (Slag Cement Association, 2018b).

Au cours du dernier siècle, l'intérêt des pouzzolanes comme ajout cimentaire a refait surface. Dès le début du 20^e siècle, les qualités des cendres volantes sont reconnues. Elles ont ensuite commencé à être utilisées à la moitié de ce siècle. (Thomas, 2007) Les cendres volantes sont un sous-produit de la combustion du charbon et sont obtenues notamment dans les centrales électriques au charbon. (Association of Canadian Industries Recycling Coal Ash [CIRCA], 2002) La fumée de silice, pour sa part, aurait d'abord fait l'objet de tests dans les bétons en 1952. C'est au cours des années 1970 que cet ajout cimentaire aurait réellement commencé à être utilisé. (Gapinski et Scanlon, s. d.) Ce matériau est la forme oxydée d'un sous-produit de la fabrication de silicium libre (silicium métal) et d'alliages de ferrosilicium (Condensil, 2008).

Le début des recherches sur l'utilisation des résidus de verre comme agrégats dans le béton date des années 1960 (Shekhawat et Aggarwal, 2014). Cependant, l'intérêt pour les propriétés pouzzolaniques de la PVM n'a pris forme qu'au tournant du 21^e siècle, notamment grâce aux travaux de Shao, Lefort, Moras et Rodriguez (2000). Cette équipe a démontré les qualités de ce matériau et affirme que [Traduction] « L'utilisation de résidus de verre broyés comme remplacement de ciment [...] dans le béton semble faisable. » (Shao et al., 2000). Cette équipe a également découvert que la taille du verre influençait sa réactivité pouzzolanique. Selon ces chercheurs, plus la poudre de verre est fine, plus elle réagit avec le ciment et plus les qualités du béton sont améliorées. Selon eux, de la poudre de verre d'une taille égale ou inférieure à 38 µm améliorerait les propriétés du béton alors qu'une taille de 75 µm ou 150 µm ne permettrait aucune amélioration notable. (Shao et al., 2000)

Quatre ans après les travaux de Shao et de son équipe, le professeur Arezki Tagnit-Hamou de l'Université de Sherbrooke est devenu titulaire d'une chaire de recherche de la SAQ et son équipe et lui ont poussé la recherche et développement en ce sens. Depuis, de la PVM a été utilisée dans des ouvrages de béton, notamment à l'intérieur et à l'extérieur de la Maison du développement durable de Montréal et de certaines succursales de la SAQ, ou encore dans des trottoirs du Musée des Beaux-Arts de Montréal. (Tricentris, s. d.) Selon Yahia (2012), la PVM aurait des impacts positifs sur les propriétés mécaniques d'un béton lorsqu'elle compose 15, 20 et 25 % du mélange de ciment. En fait, le verre pourrait remplacer jusqu'à 30 % du ciment et en améliorer certaines caractéristiques (Équiterre, 2014 ; Tricentris, s. d.).

Les propriétés pouzzolaniques d'une matière proviennent de la présence de SiO₂ et de Al₂O₃ amorphes. Afin d'évaluer le potentiel pouzzolanique de différents ajouts cimentaires, le tableau 5.1 présente la composition chimique de ceux-ci. La PVM, moins riche en SiO₂ et Al₂O₃ que la fumée de silice, a toutefois une teneur plus élevée que le LHF et équivalente à celles des cendres volantes. La figure 5.2 démontre

également la distribution de différents matériaux cimentaires en fonction de leur teneur en SiO_2 , Al_2O_3 et CaO .

Tableau 5.1 Composition chimique d'ajouts cimentaires de source recyclable (compilation d'après : Chekireb, 2015, p. 50-52 et Shao et al., 2000, p. 92)

Matériau	Composition chimique (%)			
	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	CaO
Laitier de haut-fourneau	35	11	0,2	42,0
Cendres volantes (classe F)	41-54	21-30	0,7	3
Fumée de silice	93-97	0,4-0,5	0,2-0,4	0,6-0,8
Poudre de verre sodocalcique	70-73	2	13-16	5-11

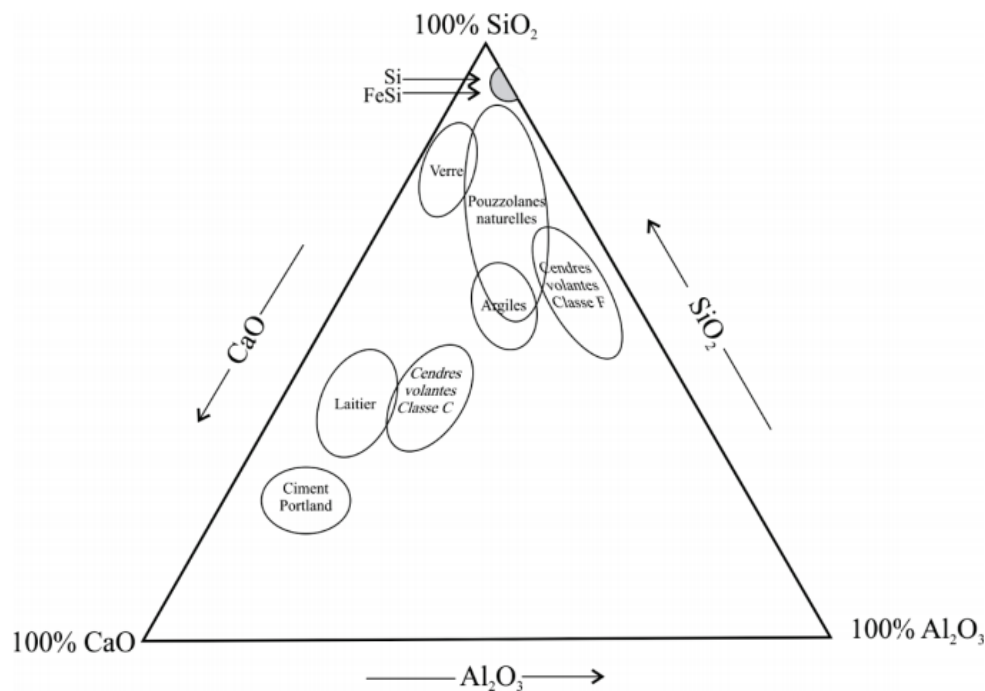


Figure 5.2 Distribution de matériaux cimentaires en fonction de leur composition chimique (tiré de Lessard, 2016, p. 11)

Aperçu de l'industrie cimentière au Canada

Les usines cimentières canadiennes ont produit, en 2016, 12 millions de tonnes de ciment. Au cours de cette même année, le Québec a produit 2,4 millions de tonnes de ce matériau. (Gouvernement du Canada, 2018)

Selon Smith (2009), le Canada avait produit 14,3 millions de tonnes de ciment, auxquelles s'ajoutaient 2,4 millions de tonnes d'ajouts cimentaires tels que les cendres volantes, la fumée de silice et les LHF. Les ajouts cimentaires représenteraient ainsi 14 % des ciments produits au Canada.

Les industries canadiennes produisent toutefois des surplus de matériaux pouvant être utilisés comme ajouts cimentaires. Par exemple 4,8 millions de tonnes de cendres volantes avaient été produites par les industries canadiennes en 2001. De ce nombre, seules 523 600 tonnes avaient été valorisées dans la fabrication de béton au Canada. (Bouzoubaâ et Fournier, 2005) Le tableau 5.2 représente la production et l'utilisation, dans les bétons, des pouzzolanes artificielles au Canada en 2001.

Tableau 5.2 Production canadienne de pouzzolanes artificielles et utilisation dans le béton au Canada
(compilation d'après : Bouzoubaâ et Fournier, 2005, p. 142)

Matériau	Production			Utilisation dans la fabrication de béton	
	Source	Industrie/produit	Production canadienne en 2001 (tonne)	Utilisation canadienne en 2001	Autres pays fournisseurs
Laitier de haut-fourneau	Sous-produit industriel	Fer et acier	380 000	347 000	S.O.
Cendres volantes	Sous-produit industriel	Centrales électriques au charbon	4 800 000	523 600	S.O.
Fumée de silice	Sous-produit industriel	Silicium libre et alliages de ferrosilicium	20 000	37 390	États-Unis et Norvège
Poudre de verre sodocalcique	Matière résiduelle	Principalement les contenants de boissons et d'aliments	S.O.	S.O.	S.O.

Au niveau québécois, les ajouts cimentaires sont actuellement inclus à certains ciments et sont vendus notamment par les entreprises Ciment Québec, Colacem, CRH et Lafarge (Pinchou, 2018). Plus concrètement, selon une conseillère de SNC Lavalin pour la construction du Nouveau pont Champlain, des cendres volantes, de la fumée de silice et des LHF seraient utilisés dans les bétons dudit pont (Véronique Richard-Charrier, échange de courriels, 17 avril 2018). L'entreprise Béton Provincial confirme qu'ils ont développé un mélange composé de ciment Portland, de cendres volantes et de fumée de silice dans le cadre de la construction du pont et qui est également utilisé dans des projets d'Hydro-Québec (Béton Provincial, 2017).

En ce qui a trait au verre micronisé comme ajout cimentaire, deux entreprises québécoises ont développé des procédés de production. L'entreprise Tricentris de Lachute a développé le produit Verrox, une poudre micronisée de verre provenant de centres de tri (Tricentris, s. d.). L'entreprise Les Produits Verglass Inc., située à Mirabel, a également développé une PVM. Celle-ci est issue de verre post-consommation et post-industriel pouvant être utilisée dans les bétons (Verglass, s. d.).

Enfin, l'entreprise québécoise Les Métaux Canadiens Inc. étudie présentement un projet de production d'alliages de silicium près d'un dépôt de silice de haute pureté à proximité de Matane. Selon ce projet, nommé Langis, l'usine pourrait produire 24 000 tonnes de fumée de silice annuellement comme coproduit de la production de silicium.

Aspects économiques

Les ajouts cimentaires présentés précédemment ont en commun d'être des matières traditionnellement vouées à l'élimination. Leur valorisation au sein des bétons, en remplacement du ciment, peut donc représenter un avantage économique à certains niveaux.

D'abord, certaines pouzzolanes artificielles se vendent à un coût inférieur au ciment (Shwekat, 2015 ; Thomas, 2007). Le remplacement de ce dernier par une matière moins dispendieuse et, qui plus est, améliore les caractéristiques du produit final, représente donc une diminution directe des coûts. Ceci n'est toutefois pas vrai pour tous les ajouts cimentaires. Par exemple, la fumée de silice est plus dispendieuse que le ciment et perd donc son avantage économique. Sa teneur très élevée en SiO_2 lui confère toutefois un intérêt certain. Le tableau 5.3 présente les prix de certaines matières. Les coûts représentés sont des valeurs pour les États-Unis. De ce fait, ils ne sont possiblement pas exactement transposables à la réalité québécoise. Par exemple, il peut être moins avantageux pour le Québec de s'approvisionner en cendres volantes puisqu'aucune centrale électrique au charbon n'est en activité dans cette province. Les valeurs donnent toutefois un aperçu des économies ou des dépenses supplémentaires potentielles en fonction des ajouts cimentaires.

Ensuite, le détournement des sous-produits industriels de l'élimination représente un gain pour les entités qui sont responsables de payer cette dernière. Actuellement, les municipalités québécoises paient la collecte, les exploitants de LET ou d'incinérateurs, ainsi que les redevances gouvernementales. De plus, une hausse des volumes de matières envoyées à l'élimination par une municipalité représente une

diminution de la part des redevances régulières qui lui sont redistribuées par le gouvernement (Gouvernement du Québec, 2018b).

Tableau 5.3 Prix du ciment et d'ajouts cimentaires aux États-Unis (compilation d'après : DeFord, 2016, p. 17; Jim Wolsiefer, échange de courriels, 2018; Statistica, 2018; Tucker, Ferraro, Laux et Townsend, 2018, p. 245; United States Geological Survey [USGS], 2017, p. 1)

Matière	Prix	Année	Sources
Ciment Portland	113 US \$/tonne	2017	Statistica, 2018
	120 US \$/tonne	2015	Tucker et al., 2018
	130 US \$/tonne	S.O.	DeFord, 2016
Laitier de haut-fourneau	≤ 110 US \$/tonne	2016	USGS, 2017
Ciment de laitier de haut-fourneau	115 US \$/tonne	S.O.	DeFord, 2016
Cendres volantes	35 US \$/tonne	S.O.	DeFord, 2016
	40 US \$/tonne	S.O.	Tucker et al., 2018
Fumée de silice	450-600 US \$/tonne	2018	Jim Wolsiefer pour Norchem, Inc., échange de courriels, 2018
	1100 US \$/tonne	S.O.	DeFord, 2016

Au niveau québécois, la génération de résidus de verre est très importante et son élimination représente des coûts non négligeables. Pour les municipalités et les citoyens québécois, il est donc préférable de valoriser cette matière plutôt que les cendres volantes achetées à l'extérieur du Québec. En outre, la production de cet ajout cimentaire est appelée à ralentir dû à une réduction prévue de la combustion du charbon (Sorensen, 2016). En effet, le Canada souhaite cesser l'utilisation de ce combustible d'ici 2030 (Gouvernement du Canada, 2018). Il est donc possible de croire que les cendres volantes seront de moins en moins accessibles et abordables, et que la nécessité de trouver une alternative est bien réelle. Une réduction de la combustion du charbon au profit du gaz naturel s'observe également aux États-Unis (DeFord, 2016). Il est à noter que des ajouts cimentaires alternatifs, c'est-à-dire non normalisés, pourraient remplacer les cendres volantes de centrales électriques au charbon, à l'instar de la PVM. Par exemple, les laitiers d'acier ainsi que les cendres de foyer, de biomasses et d'incinérateurs municipaux présentent des propriétés pouzzolaniques (Lessard, 2016).

Aspects environnementaux

L'intérêt environnemental principal de l'intégration de PVM recyclé dans le béton provient principalement de la réduction de la consommation de ciment. L'industrie cimentière est responsable d'une part importante des émissions de GES tant au niveau local que mondial. C'est pourquoi il est primordial d'éviter la production de ce matériau. Le tableau 5.4 quantifie les émissions de GES de cette industrie.

Tableau 5.4 Quantités de gaz à effet de serre émis par les cimenteries (compilation d'après : Environment and Climate Change Canada [ECCC], 2017a, p. 5; ECCC, 2017b, p. 15 ; Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MDDELCC], 2016, p. 22 ; Olivier, Janssens-Maenhout, Muntean, et Peters, 2015, p. 4 et 38)

Région	Secteur	Année	Émissions	
			Émissions absolues (tonnes éq. CO ₂)	Émissions relatives aux émissions totales de la région (%)
Québec	Cimenteries et usines à chaux	2014	1,8 million	2,2
Canada	Ciment et béton	2015	11 millions	1,5
Mondial	Ciment	2015	2 850 millions	8

Il est approximé que la production d'une tonne de ciment émet une tonne de CO₂ et que remplacer ce matériau permet d'éviter l'émission de GES (SAQ, s. d.). Les émissions de GES proviennent principalement de la cuisson du calcaire et de l'argile, un procédé très énergivore et qui libère une molécule de CO₂ par molécule de calcaire calciné tel que vu à la l'équation 5.1.



L'extraction et le transport des matières premières, ainsi que le broyage des matériaux émettent également des GES (Miller, 2018). Au total, la production d'une tonne de ciment génère légèrement moins d'une tonne d'équivalent CO₂ et cette valeur dépend du type de ciment. En effet, le ciment Portland au calcaire (CPC) contient du calcaire non calciné (CaCO₃), ce qui évite la nécessité de le chauffer et la libération du CO₂. Le CPC peut inclure jusqu'à 15 % de calcaire, pouvant réduire les émissions de GES de 10 % (CRH Canada Group Inc., 2017). Le tableau 5.5 présente les émissions de GES pour la production d'une tonne de ciment Portland et de CPC. Lorsque des ajouts cimentaires sont utilisés pour remplacer une portion du ciment, il est nécessaire de considérer les émissions de GES liées au conditionnement du matériau. Le transport doit également être pris en compte, notamment s'il est livré à une cimenterie pour être inclus dans un mélange. Le verre étant recyclé au niveau local, le transport de la PVM comme ajout cimentaire a donc un impact limité comparativement aux matières importées.

L'utilisation de la PVM récupéré pour remplacer le ciment permet également de diminuer la pression sur les matières premières telles que l'argile et le calcaire, et ce tout en réduisant le volume de déchets éliminés.

Tableau 5.5 Émissions de GES pour la production d'une tonne de ciment ou d'ajout cimentaire
(compilation d'après : CSA Group, 2014, p. 12-13 ; Miller, 2018, p. 590)

Ciment	Lieu	Émission de gaz à effet de serre en fonction des phases du cycle de production (kg éq. CO ₂)			
		Matières premières	Transport	Fabrication	Total
Ciment Portland	Canada	17,9	9,0	913,6	940,5
Ciment Portland au calcaire	Canada	17,4	8,3	829,9	855,6
Laitiers de haut-fourneau	Pennsylvanie	S.O.	Inconnu	85	Inconnu
Cendres volantes	Wyoming	S.O.	Inconnu	29	Inconnu
Fumée de silice	Inconnu				
Poudre de verre	Inconnu				

Analyse de cycle de vie

L'utilisation de la PVM comme pouzzolane dans les bétons a été étudiée par Quantis dans le cadre de son ACV de projets de commercialisation du verre récupéré par les centres de tri au Québec (Quantis, 2015). La firme a comparé cette technologie aux trois scénarios de base de son étude, présentés aux sections 4.1 et 4.2 du présent essai. L'annexe 5 détaille le scénario d'utilisation de la PVM comme ajout cimentaire (4.3) et des trois scénarios de base (1, 2 et 3). Selon ses paramètres, Quantis considère les impacts de la production de $3,9 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ de PVM en comparaison avec la production du même volume de ciment Portland.

Les conclusions de l'étude démontrent que la production de PVM a un impact négligeable comparativement à la production de ciment Portland selon différents indicateurs : CC, santé humaine, et ressources. De plus, l'impact sur la qualité des écosystèmes et sur l'eau prélevée est également plus faible, mais moins négligeable. Il a été affirmé précédemment que l'intérêt principal de la réduction de production de ciment Portland réside dans la réduction des émissions de GES qui y est associée. La figure 5.3 montre donc l'impact des trois scénarios sur l'indicateur influencé par les GES, soit celui des CC.

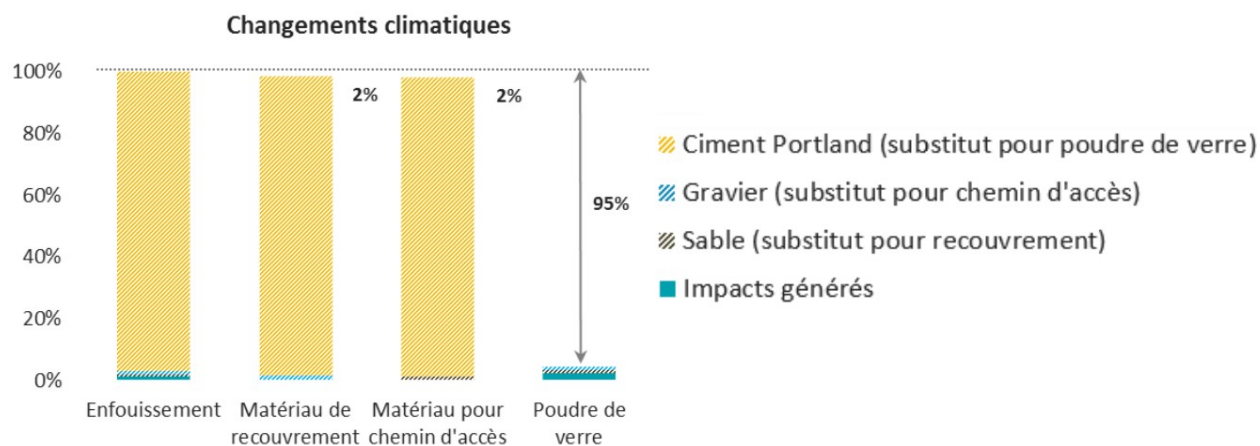


Figure 5.3 Comparaison de l'impact sur les changements climatiques de différents scénarios de valorisation des résidus de verre issus des centres de tri au Québec (inspiré de Quantis, 2015, p. 47)

Limites de l'étude

L'ACV de Quantis présente certaines limites qui peuvent avoir un impact important sur ses résultats. D'abord, les paramètres de l'étude stipulent que la PVM remplace le ciment Portland dans des volumes équivalents. Il est possible que ce choix d'unités réponde à un besoin ou une convention. Toutefois, cette base comparative ne semble pas refléter la réalité. En effet, les documents consultés au cours du présent essai considèrent le remplacement du ciment par des ajouts cimentaires en fonction du poids (Chekireb, 2015 ; Crouch, Hewitt et Byard, 2007 ; Thomas, 2007). Ainsi, la production de 0,985 kg de PVM devrait être comparée à la production de 0,985 kg de ciment Portland. Le tableau 5.6 montre la différence entre les paramètres de Quantis et les paramètres modifiés. Le scénario modifié montre une diminution de 19 % de la quantité de ciment Portland évité lors de son remplacement par de la PVM. De ce fait, l'impact de la production de ce matériau devrait être diminué de 19 %. Conséquemment, les scénarios d'enfouissement et d'utilisation du verre comme matériau dans les sites d'enfouissement devraient avoir un impact environ 19 % plus faible que ceux démontrés à la figure 5.3. En effet, la grande majorité de l'impact de ces scénarios provient de la production de ciment Portland. La figure 5.4 montre la différence d'impact entre l'enfouissement et l'utilisation du verre comme ajout cimentaire selon le scénario de Quantis et celui modifié. Il est approximé que l'impact de la production de ciment dans le scénario de Quantis équivaut à 97 % de l'impact total de l'enfouissement pour les CC.

Tableau 5.6 Différence entre le scénario de Quantis et le scénario modifié pour le projet d'utilisation de la poudre de verre comme ajout cimentaire (inspiré de : Quantis, 2015, p. 14)

Scénario	Produit généré	Produit évité
Quantis	0,985 kg de verre micronisé avec une masse volumique spécifique de 2 540 kg/m ³ . Taux de rejet à l'étape de micronisation : 1,5 %	1,22 kg de ciment Portland avec une masse volumique spécifique de 3 150 kg/m ³
Modifié	0,985 kg de verre micronisé. Taux de rejet à l'étape de micronisation : 1,5 %	0,985 kg de ciment Portland
Différence relative	0 %	- 19 %

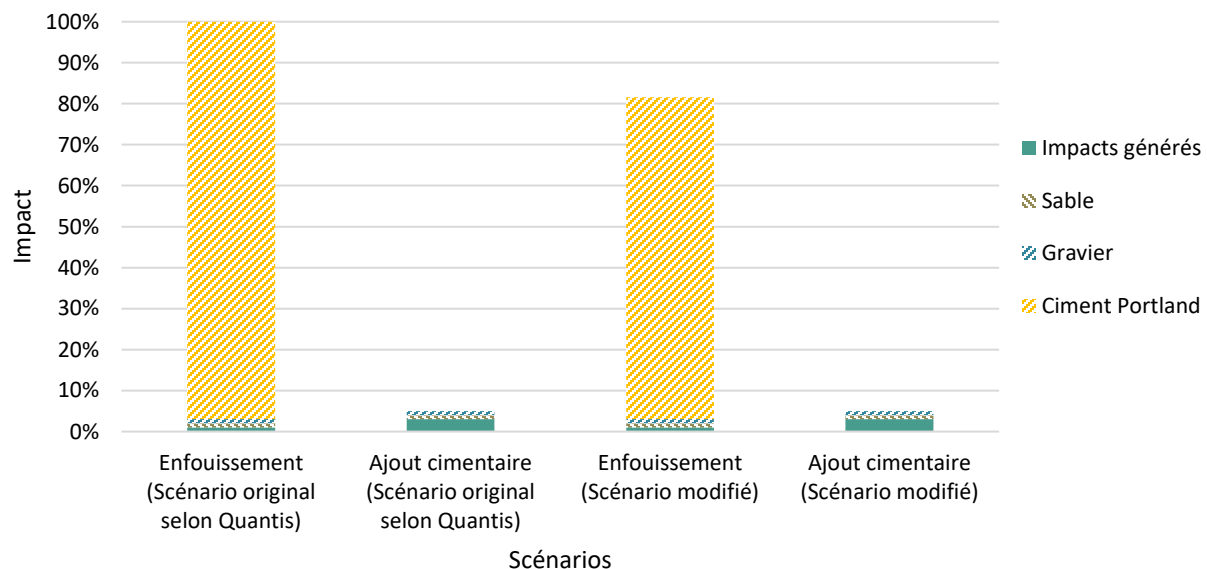


Figure 5.4 Ajustement du scénario étudié par Quantis

Une autre limite de l'ACV de Quantis, plus importante que la précédente, réside dans la définition même du projet. En effet, la firme énonce que le verre remplacera une portion du ciment Portland dans la fabrication de béton. Or, un béton préparé à partir d'un mélange de ciment Portland et de pouzzolanes n'a pas les mêmes caractéristiques qu'un béton préparé à partir de ciment Portland seulement. Il est important, dans l'élaboration d'une ACV, de comparer deux produits ayant des caractéristiques semblables. Au Québec, les cimentières proposent déjà des mélanges de ciment qui contiennent des ajouts cimentaires tels que des cendres volantes, des LHF et de la fumée de silice. Les cendres volantes, utilisées dans des quantités semblables à la PVM, donnent des caractéristiques semblables à cette dernière à un ciment. Elles offrent également un avantage économique, comme la PVM. Il est donc logique de croire que cette dernière sera en compétition directe avec les cendres volantes du point de vue

économique et technique. Quantis aurait donc pu comparer la PVM comme ajout cimentaire aux cendres volantes. Sans avoir suffisamment de données pour en extrapoler une comparaison semblable à celle de Quantis, il est toutefois possible d'imaginer que l'impact sur les CC des cendres volantes est beaucoup plus faible que le ciment Portland. En fait, puisqu'il s'agit en majorité d'un sous-produit de procédé d'incinération, les émissions de GES liées à sa production ne sont considérées que pour les activités principales du procédé dont il est issu. À titre d'exemple, la majorité des cendres volantes proviennent de la combustion du charbon dans les centrales électriques au charbon ; les émissions de GES liées à cette combustion ne sont donc pas liées à la production de cendres volantes, mais bien à celle d'électricité. Les émissions de GES en lien avec les cendres volantes se limitent donc qu'à leur conditionnement, ainsi qu'à leur transport. Si le conditionnement des cendres volantes et celui des résidus de verre peuvent être considérés comme approximativement équivalents, le transport des cendres volantes est cependant plus important. En effet, au Québec, les cendres volantes sont importées des autres provinces canadiennes. De ce fait, la PVM devrait avoir un impact sur les CC plus faibles que les cendres volantes. Toutefois, cet avantage est beaucoup moins important que ce qu'affirme Quantis en le comparant au ciment Portland.

L'argument précédent se base sur le fait que les cendres volantes sont actuellement disponibles en grandes quantités sur le marché canadien et que celles-ci ne sont utilisées qu'en faibles quantités selon le tableau 5.2. Pourtant, cet ajout cimentaire représente un avantage économique et environnemental. Or, les cimenteries québécoises continuent à vendre du ciment Portland sans ajout cimentaire. Peu importe leur raison, il faut donc considérer que les cimenteries continueront à vendre ce type de ciment et que, si elles souhaitent utiliser la PVM, ils le feront en remplacement des cendres volantes.

L'analyse de Quantis démontre toutefois bien l'intérêt de la PVM en remplacement du ciment Portland. Ce scénario pourrait s'avérer intéressant dans le cas où le gouvernement québécois ou les municipalités québécoises adoptent, à des fins environnementales, des lois ou règlements obligeant l'utilisation d'ajouts cimentaires. Dans ce cas, le marché du ciment Portland pur devrait diminuer, faisant place à des mélanges de ciment contenant des pouzzolanes. Dans le cadre québécois, l'utilisation d'une matière locale, telle que les résidus de verre, représente une option plus intéressante d'un point de vue environnemental et social que l'utilisation de cendres volantes d'autres provinces canadiennes ou de l'étranger. Cette affirmation est d'autant plus vraie que la production de ce matériau est appelée à diminuer, ce qui pourrait induire une pression sur le marché et en augmenter le coût. Enfin, au niveau de la santé, le SiO_2 présent dans le verre est amorphe, alors que les cendres volantes contiennent en partie du SiO_2 cristallin qui présente des dangers pour la santé pulmonaire (Lockwood, s. d.).

Il est également pertinent de considérer que la PVM québécoise, avec un contenu en SiO_2 de l'ordre de 70 %, pourrait faire face à un compétiteur québécois de taille si le projet Langis de l'entreprise Les Métaux Canadiens Inc. devait se concrétiser. En effet, comme vu précédemment, cette entreprise québécoise estime qu'elle pourra produire 24 000 tonnes de fumée de silice comme coproduit de sa production de silicium. La fumée de silice est un ajout cimentaire actuellement reconnu et utilisé par les cimenteries, et contenant plus de 90 % de SiO_2 amorphe. Toutefois, ces 24 000 tonnes ne représentent que 1 % de la production québécoise de ciment pour l'année 2016. Cette fumée de silice ne saturerait donc pas le marché des ajouts cimentaires au Québec.

Enfin, la commercialisation des résidus de verre comme ajout cimentaire ne doit pas entrer en compétition avec leur utilisation comme matière secondaire entrant dans la fabrication de nouveaux contenants de verre. En effet, si les verriers n'ont plus accès aux résidus de verre, ils devront utiliser des matières premières, augmentant leurs émissions de GES. Toutefois, il faut rappeler que les résidus de verre récupérés au Québec ne sont achetés qu'en très faible quantité par le verrier Owens-Illinois, notamment parce que ce dernier ne s'intéresse pas au verre mixte des centres de tri. Les cimenteries pourraient donc avoir accès à une grande quantité de verre mixte, et ce, sans entrer en compétition avec le verrier.

Normalisation des ajouts cimentaires

Les normes CSA, développées par l'Association canadienne de normalisation (CSA), sont des documents qui encadrent divers sujets en définissant des limites et des conditions. Le respect de ces normes assure la qualité d'un projet ou d'un produit sur le plan de la performance, de la sécurité, de la protection de l'environnement, etc. (CSA Group, 2018) Dans le domaine de la construction, les codes du bâtiment provinciaux sont étroitement liés à différentes normes CSA (Cement Association of Canada, 2018). De ce fait, le respect de ces documents assure la qualité d'une construction tout en protégeant les personnes responsables de sa conception.

Certaines normes CSA encadrent la composition des bétons et des ajouts cimentaires. Plus précisément, la norme CSA A3001 décrit les compositions chimiques et les propriétés physico-chimiques que devraient respecter les ajouts cimentaires. Elle définit également les tests devant être effectués sur ces matériaux. (CSA Group, 2015) La norme la plus récente, CSA A3000-13, considère comme ajout cimentaire les cendres volantes, les LHF, la fumée de silice et les pouzzolanes naturelles (De Belie, Soutsos et Gruyaert, 2017). Ainsi, au moment d'écrire ces lignes, l'utilisation de la PVM comme ajout cimentaire n'était pas normalisée et la qualité d'un tel produit ne pouvait être assurée. Cet état de fait limitait l'utilisation de ce matériau.

Le mois de mai 2018 a toutefois vu l'adoption d'une nouvelle version de la norme CSA A3000. Cette nouvelle mouture introduirait la PVM comme ajout cimentaire, et ce, tout en définissant la composition chimique du matériau. Cette addition à la norme pourrait favoriser l'utilisation du verre recyclé et en augmenter la popularité et sa part de marché.

Certification LEED

Il est intéressant de mentionner que l'utilisation d'ajouts cimentaires recyclés, tels que la PVM, permet d'accumuler des points dans un projet aspirant à être certifié LEED (Écohabitation, 2012 ; Pavie, 2014).

5.3.2 Agrégats dans le béton

En plus de pouvoir être utilisé comme ajout cimentaire sous forme de poudre micronisée dans le béton, le verre peut également remplacer les agrégats tels que les calcaires (Quantis, 2015). D'un point de vue environnemental, cette application se limite à diminuer la pression sur les matières premières, tout en évitant de remplir les sites d'enfouissement. Elle permet également d'éviter le traitement de matières premières. De ce fait, ce projet se compare à l'utilisation du verre comme matériau de recouvrement dans les lieux d'enfouissement ou dans la fabrication de sous-fondation de routes. Ces applications sont présentées aux sections 4.1 et 4.2.

Selon l'ACV conduite par Quantis, ce projet a un impact environnemental semblable aux applications en LET, excepté en ce qui a trait à l'indicateur d'eau prélevée et la qualité des écosystèmes. En effet, le projet d'agrégats de verre dans le béton a un impact respectivement plus et moins élevé pour ces deux indicateurs, et ce, comparativement aux utilisations en LET. (Quantis, 2015)

Ce dernier projet, comparativement aux autres technologies étudiées par Quantis, n'est toutefois pas intéressant. En effet, la fabrication de nouveaux contenants de verre, de laine de verre et l'utilisation du verre comme ajout cimentaire restent des options plus pertinentes d'un point de vue environnemental.

5.3.3 Le verre comme additif industriel

La PVM, tel qu'introduit à la section 5.2.1, peut servir à différentes autres applications. Tel que le rapporte l'entreprise Les Produits Verglass Inc., ce matériau peut remplacer différentes matières de charge, matériaux de remplissage et autres additifs dans divers produits. À titre d'exemple, les adhésifs, caoutchoucs, encres, peintures et plastiques pourraient bénéficier de la PVM comme additif. Plus concrètement, ce matériau détient une blancheur lui permettant de remplacer en partie des pigments

coûteux tels que le dioxyde de titane. De plus, sa conductibilité thermique lui donne un avantage technique au sein de produits nécessitant une cuisson uniforme comme le caoutchouc. Dépendamment de l'utilisation, l'avantage de la PVM peut être environnemental ou financier, principalement du fait qu'il s'agit d'un produit post-industriel ou post-consommation en remplacement d'une matière première. (Verglass, s. d.) Enfin, son impact sur la santé est faible puisqu'il est composé principalement de SiO_2 et que ce dernier est sous forme amorphe.

Au contraire de certaines applications présentées précédemment, celle présentée ci-haut n'a pas fait l'objet d'une ACV. Il est toutefois possible d'imaginer que l'avantage environnemental de l'utilisation de la PVM dépend de plusieurs facteurs. D'abord, puisqu'elle est appelée à remplacer différents matériaux traditionnellement utilisés, l'impact environnemental de ces derniers a un effet direct sur la comparaison avec la PVM. Ainsi, l'extraction, le conditionnement et le transport des matériaux habituels doivent être considérés. Ensuite, l'impact environnemental dépend des lieux d'extraction et de conditionnement de ces matériaux puisque le profil énergétique et le cadre réglementaire en matière de protection de l'environnement varient d'une région à l'autre. Le lieu d'utilisation du matériau est également important. En effet, une poudre de verre produite au Québec aura un impact important sur l'environnement si elle est utilisée dans le sud-ouest des États-Unis, et ce, dû à son transport. Enfin, d'autres facteurs, plus techniques, peuvent produire un effet sur le cycle de vie. Par exemple, il est important de savoir si la PVM remplace un matériau dans des proportions identiques (une tonne de PVM remplace une tonne de matériau traditionnel) ou différentes. Il faut également vérifier si la durabilité du produit est supérieure ou inférieure avec la PVM. Si l'utilisation de la PVM augmente la durée de vie d'un produit, son impact environnemental est diminué.

Dans tous les cas, il est fort probable que les différentes applications de la PVM comme additif industriel soient intéressantes et pertinentes d'un point de vue environnemental, social, sanitaire et potentiellement économique. Du fait qu'il s'agisse d'une matière recyclée, inerte et développée dans une région où la qualité de vie des travailleurs, la PVM produite au Québec peut surpasser plusieurs matières premières, surtout si elle est utilisée localement.

Il est toutefois difficile d'imaginer qu'une application de la PVM puisse être plus intéressante, au niveau environnemental, que son intégration dans le béton. Dans ce dernier, le verre permet d'éviter une grande quantité de GES émis lors de la calcination des matières premières du ciment. Cet avantage très substantiel n'est pas nécessairement retrouvé dans les autres utilisations.

6. PERSPECTIVE DE LA GESTION DU VERRE AU QUÉBEC SELON LE CONTEXTE ACTUEL

Au tournant des années 2010, le Québec réussissait à mettre en valeur plus de la moitié de son verre. En 2010, 76 000 tonnes de verre issu de la collecte sélective avaient été valorisées, soit 53 % du volume généré par le secteur résidentiel. (RECYC-QUÉBEC, 2013) À cette époque, l'usine de conditionnement de verre Klareco traitait 80 % du verre issu des centres de tri québécois (Bussières, 2013, 29 juillet). Les résidus conditionnés pouvaient être vendus à des recycleurs tels que l'usine de fabrication de bouteilles de verre montréalaise Owens-Illinois. Encore aujourd'hui, cette entreprise est prête à acheter du verre récupéré de grande qualité. En effet, selon François Carrier, directeur de ladite usine, la totalité de la matière première utilisée pour la fabrication de bouteille pourrait être remplacée par du calcin. Considérant une production d'environ 450 tonnes de verre quotidiennement, ce sont plus de 150 000 tonnes de verre récupéré qui pourrait être recyclé de cette façon. (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018). Ce débouché pourrait, en théorie, permettre de recycler la quasi-totalité des 156 000 tonnes de résidus de verre générés par le secteur résidentiel québécois.

Cependant, depuis la fermeture de l'usine Klareco en 2013, le Québec éprouve de la difficulté à recycler son verre malgré la demande en calcin.   preuve, le taux d'acheminement du verre récupéré aux fins de recyclage est passé de 53 % à 14 % entre 2010 et 2015. Les  v nements des dernières années démontrent donc que la problématique du recyclage du verre ne se situe pas dans la demande des marchés ni au niveau technologique puisque Klareco semble avoir été capable de produire du verre récupéré de qualité à partir des résidus des centres de tri.

Selon le communiqué que Klareco a rendu public lors de sa fermeture, des raisons économiques expliquent cette dernière (Côté, 2013, 27 avril). Plus précisément, l'usine aurait été incapable d'assumer « [...] les frais rattachés au traitement du verre [...] » (Côté, 2013, 27 avril). Il est donc évident que la crise du verre à laquelle le Québec fait face actuellement est au moins en partie d'origine économique. L' p rience des dernières années démontre que le recyclage du verre issu de la collecte sélective en nouveaux contenants de verre n'est pas durable d'un point de vue économique.

Depuis le début de la crise du verre en 2013, le Québec a évolué sur plusieurs fronts qui ont été discutés au cours du présent essai. Il est pertinent de se demander, à la lumière de ces changements, si le Québec est en voie de réussir à gérer ses résidus de verre de façon plus durable qu'actuellement et qu'en 2010. Le chapitre qui suit s'attarde au concept de durabilité afin de répondre à cette question. La notion de durabilité sera d'abord définie afin de poser les bases de la réflexion. Ensuite, le contexte actuel du verre

au Québec, en fonction de ce qui a été présenté dans les sections précédentes, sera analysé selon les différents piliers du DD.

6.1 Analyse de la gestion des résidus de verre selon le développement durable

Le concept de DD peut différer d'une personne à l'autre et d'une région à l'autre du monde. Toutefois, le gouvernement québécois le conçoit, selon la *Loi sur le développement durable*, comme étant « [...] un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs [...] » (*Loi sur le développement durable*). Cette définition, directement tirée du rapport Brundtland, considère comme indissociables et égales les dimensions environnementales, sociales et économiques (*Loi sur le développement durable*). Il est fréquent de convenir que la gouvernance agit comme une quatrième dimension du DD. La Loi susmentionnée porte d'ailleurs comme titre « Gouvernance fondée sur le développement durable » (*Loi sur le développement durable*). Bien que certains modèles considèrent certaines dimensions comme étant plus importantes que d'autres, le présent essai n'a pas pour but de les hiérarchiser. Ce concept n'est utilisé ici que pour analyser le contexte actuel du Québec, ainsi que son potentiel à implanter une gestion durable du verre dans un avenir rapproché. Cette analyse s'inspirera des quatre dimensions du DD ainsi que des 16 principes de DD définis par la Loi. Ces derniers sont présentés à l'annexe 7 et seront utilisés en fonction de leur pertinence dans la gestion du verre au Québec.

6.1.1 Dimension de la gouvernance

La gouvernance peut être représentée comme la structure de gestion des résidus de verre au Québec. Elle considère les acteurs impliqués dans le développement de nouvelles technologies et de nouveaux marchés dans le but de gérer le verre de façon durable. La subsidiarité, telle que définie dans la *Loi sur le développement durable*, est une composante importante de la gouvernance. Selon ce principe, « [l]es pouvoirs et les responsabilités doivent être délégués au niveau approprié d'autorité. » (*Loi sur le développement durable*).

Or, il semble que le gouvernement québécois ait rapidement reconnu son rôle à la suite de la fermeture de l'usine Klareco et à la chute de la valorisation des résidus de verre dans la province. En effet, des mesures ont rapidement été mises en place par la société d'État RECYC-QUÉBEC et par l'organisme sans but lucratif ÉEQ agréé par RECYC-QUÉBEC. En effet, moins de deux ans après la fermeture de l'usine Klareco, Quantis remettait une ACV que RECYC-QUÉBEC lui avait demandé concernant les projets de

commercialisation du verre mixte récupéré par les centres de tri québécois. RECYC-QUÉBEC a aussi utilisé une partie du budget de son programme d'implantation de technologies et de procédés et développement des marchés afin d'aider les différents acteurs du recyclage du verre à affronter la crise. ÉEQ s'est également intéressé aux débouchés possibles du verre issu des centres de tri. Moins de trois ans après le début de la crise, l'organisme a annoncé le plan Verre l'innovation qui a pour but d'aider les centres de tri à surmonter la problématique du verre. L'aide offerte par l'organisme est d'ordre technologique et économique. ÉEQ a également reconnu l'importance des centres de tri privé dans la gestion des résidus de verre. Ses investissements de 1,2 million de dollars ont permis à cinq de ces centres de faire l'essai de technologies novatrices d'implosion de verre afin d'améliorer la pureté du produit à la sortie des usines (ÉEQ, 2016).

Les recycleurs du verre ont également été impliqués dans la recherche de solutions pour le recyclage du verre. Selon François Carrier de l'usine Owens-Illinois de Montréal, il aurait participé aux discussions concernant les essais de nouvelles technologies telles que Krysteline en centres de tri (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018). Les entreprises Les Produits Verglass Inc. et Tricentris ont également été impliquées au travers de discussions et partenariats avec ÉEQ. Ces deux entreprises se spécialisent en micronisation du verre et en développement de nouveaux débouchés à valeur ajoutée du verre. Ces partenariats démontrent que les procédés de recyclages traditionnels et novateurs sont actuellement considérés de façon concomitante dans l'espoir de développer une gestion optimale du verre.

D'autres acteurs ont démontré leur leadership depuis la fermeture de l'usine Klareco. Par exemple, le FCQGED milite depuis longtemps pour la généralisation de la consigne aux contenants de verre tel que les bouteilles de vin et de spiritueux. Selon ce regroupement, la consigne permet d'obtenir un taux de recyclage plus élevé des contenants, ce qui pourrait aider à détourner davantage de verre des LET. En parallèle, le mouvement citoyen Opération Verre-Vert des AmiEs de la Terre de Québec milite également pour un système de consigne plus élargi depuis 2014. Enfin, des citoyens et des municipalités se sont regroupés afin d'offrir une alternative à la collecte sélective de porte à porte. C'est le cas, par exemple, des municipalités de St-Denis-de-Brompton et de Saint-Bruno.

Ensuite, la SAQ, autre société d'État au même titre que RECYC-QUÉBEC, continu à financer la recherche et développement en lien avec le recyclage du verre, notamment par l'entremise de la Chaire SAQ de valorisation du verre dans les matériaux, détenue par le professeur Arezki Tagnit-Hamou de l'Université de Sherbrooke.

Enfin, des discussions entre certains des acteurs mentionnés précédemment ont même permis d'apporter des changements à la norme CSA A3000. En effet, l'évolution des travaux sur l'utilisation de la PVM dans le béton comme ajout cimentaire a permis d'inclure ce matériau à la norme à titre d'ajout cimentaire normalisé. Cette nouveauté permet d'augmenter la crédibilité de ce débouché à valeur ajoutée du verre aux yeux des cimenteries et des entrepreneurs en construction et travaux publics. Cette normalisation pourrait ainsi faire croître le marché de la PVM de façon importante.

Ce foisonnement d'initiatives et de partenariats démontre que plusieurs acteurs s'intéressent et s'impliquent dans la gestion du verre. Des organisations universitaires, citoyennes, gouvernementales, industrielles, municipales, privées et publiques sont mises à profit afin de régler la crise et, à long terme, de gérer les résidus de verre de façon durable. Non seulement la diversité des acteurs est-elle assurée, mais il est intéressant de remarquer que ceux-ci s'attaquent à divers enjeux du verre : la collecte des résidus, le traitement en centres de tri, le conditionnement et le recyclage. Bien qu'il soit déplorable que le mouvement pro-consigne soit peu considéré par les autres meneurs de la gestion du verre au Québec, il ne fait aucun doute que la gouvernance est plus durable qu'elle ne l'était il y a cinq ans lors de la fermeture de l'usine Klareco. Les différents acteurs semblent mobilisés et résolus à trouver une façon de gérer les résidus de verre de façon durable.

6.1.2 Dimension environnementale

Les enjeux environnementaux de la gestion du verre ont été discutés au cours des sections précédentes du présent essai. Les débouchés proposés pour les résidus de verre ont été analysés afin de déterminer s'ils démontrent un avantage environnemental en comparaison avec la gestion actuelle des résidus de verre. Il est connu que la majorité du verre ait été, depuis 2013, utilisée comme matériau de recouvrement dans les lieux d'enfouissement, ou tout simplement enfouie avec les autres déchets. Tous les autres débouchés présentent un intérêt, comparativement à l'enfouissement, du fait qu'une matière secondaire (le verre récupéré) permet de remplacer des matières premières (le sable dans les contenants de verre, dans les médias de filtration et dans le sablage par jet, le calcaire dans le ciment, ainsi que différents additifs industriels). En évitant l'extraction et l'exploitation de matières premières, tous ces débouchés respectent les principes de protection de l'environnement, de préservation de la biodiversité et de production et consommation responsables de la *Loi sur le développement durable* (MDDEP, 2009).

Certains débouchés présentent également des avantages environnementaux supplémentaires. L'utilisation de calcin dans la production de nouveaux contenants de verre permet de diminuer les

émissions de GES liées à la calcination des matières premières et à leur chauffage. L'utilisation de PVM en remplacement d'une partie du ciment dans le béton permet d'éviter des émissions de GES liés à la préparation dudit ciment. L'utilisation du verre comme média de filtration permettrait de consommer moins d'eau lors du rinçage des filtres de piscine (*backwash*). Dans tous les cas, l'utilisation d'une matière locale génère également moins de GES qu'une matière devant être importée. Ces avantages, liés aux émissions de GES et à la consommation de ressources telles que l'eau et les combustibles fossiles, respectent à nouveau les principes susmentionnés de la *Loi sur le développement durable*.

Il appert que l'utilisation du calcin dans la production de nouveaux contenants de verre semble figurer parmi les débouchés les plus intéressants d'un point de vue environnemental. En effet, son utilisation diminue la pression sur les matières premières, réduit nettement les émissions de GES et est recyclable à l'infini. Bien que cette application des résidus de verre ait participé à l'échec de la gestion du verre en 2013, il semble que ses avantages environnementaux puissent lui conférer une place de choix dans la gestion durable du verre que le Québec tente de mettre en place.

Les événements des dernières années ont également mis de l'avant un débouché autant, sinon plus, intéressant que le précédent d'un point de vue environnemental. L'utilisation de la PVM comme ajout cimentaire semble en effet répondre à la crise du verre actuelle, tout en diminuant drastiquement les émissions de GES liées aux cimenteries. Ces diminutions semblent plus importantes que celles observées dans la production de verre à partir de calcin. Cette réalité est surtout vraie si la PVM remplace du ciment dans des applications où les ajouts cimentaires ne sont actuellement pas utilisés. Autrement, si la PVM remplace le marché des ajouts cimentaires tels que les cendres volantes, l'avantage environnemental est plus limité. Il est toutefois important de rappeler que le développement de la micronisation, la sortie de la nouvelle norme CSA A3000 et l'intérêt des entrepreneurs et des municipalités pour les matériaux LEED et écologiques sont tous des facteurs qui pourraient favoriser la croissance du marché de la PVM non seulement en remplacement des autres ajouts cimentaires, mais également en remplacement du ciment.

Pour résumer, les débouchés proposés pour le verre semblent être durables d'un point de vue environnemental. L'utilisation de calcin pour la production de nouveau verre ne présenterait aucune évolution par rapport à l'état des lieux observé avant la crise du verre. Toutefois, l'utilisation de la PVM comme ajout cimentaire en remplacement du ciment présenterait une amélioration comparativement à ce qui se faisait en 2010, à l'apogée du recyclage du verre au Québec.

6.1.3 Dimension économique

Comme il a été expliqué précédemment, la crise du verre découlerait au moins en partie d'une problématique économique. Selon les responsables de l'ancienne usine Klareco, sa fermeture serait directement liée à l'incapacité de couvrir les frais rattachés au conditionnement du verre. Pour expliquer cette mauvaise balance économique, deux explications sont possibles. Il est premièrement possible que la valeur du verre récupéré sur les marchés du recyclage soit trop faible. La deuxième explication proviendrait des coûts de conditionnement trop élevés.

La valeur du verre issu des centres de tri se situe à un prix négatif d'environ -28 \$/tonne depuis 2016 (RECYC-QUÉBEC, 2018b). Les centres de tri n'ont donc aucun intérêt économique, actuellement, à mettre le verre en valeur. Toutefois, ce prix est lié à la qualité du verre pouvant être obtenu en fonction des technologies actuellement implantées dans les centres de tri. Pour l'instant, les centres de tri sont incapables de produire du verre d'assez bonne qualité pour être directement utilisé dans des procédés de recyclage. En renversant cette situation, il pourrait devenir intéressant, pour les centres de tri, de traiter et vendre cette matière. Pour cette raison, ÉEQ a financé l'essai de la technologie Krysteline dans cinq centres de tri québécois. Si ces centres de tri parviennent à produire des résidus de verre faiblement contaminé, la matière pourrait être vendue à meilleur prix et, potentiellement, directement aux recycleurs. De la même façon, la micronisation du verre développée par Les Produits Verglass Inc. et par Tricentris pourrait permettre de produire une PVM ayant des caractéristiques intéressantes, justifiant un prix de vente plus élevé.

Il faut toutefois se rappeler que le recycleur de verre actuellement le mieux établi au Québec, c'est-à-dire le verrier Owens-Illinois, ne sera potentiellement pas prêt à acheter du verre de bonne qualité issu de la collecte sélective si son coût est plus élevé que la matière première ou que le verre issu de la consigne. Selon François Carrier, ces deux matières sont actuellement achetées à un coût similaire, soit à environ 100 \$/tonne (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018). Si la gestion du verre au Québec doit tourner autour de ce recycleur, il est primordial de développer des méthodes de traitement et de conditionnement permettant de vendre la matière à ce prix afin de respecter le principe d'efficacité économique de la Loi.

Il est cependant possible de développer des débouchés à haute valeur ajoutée afin de justifier la vente de résidus de verre à prix plus élevé. La micronisation permet de concrétiser ceci en améliorant les propriétés du verre. Par exemple, le verre micronisé détient une activité pouzzolanique que le verre conventionnel n'a pas. La PVM pourrait ainsi être vendue comme ajout cimentaire aux cimenteries qui pourraient ensuit

l'intégrer à leurs mélanges. Ces mélanges cimentaires à valeur ajoutée pourraient ensuite être vendus à prix plus élevés comme le sont actuellement les ciments mélangés à des cendres volantes ou à de la fumée de silice.

Pour terminer, la dimension économique présente certains aspects encore mal connus des acteurs de la gestion du verre. Il est difficile, à l'heure actuelle, de prévoir le coût de traitement et de conditionnement du verre si la technologie Krysteline est implantée. De la même façon, le prix de la PVM issue de la collecte sélective n'est pas connu. Cependant, le développement de débouchés à valeur ajoutée augmente la versatilité des résidus de verre et permettra d'assurer une meilleure diversité et pérennité des marchés. L'introduction de la PVM comme ajout cimentaire normalisé dans la nouvelle norme CSA A3000 pourrait être un moment décisif dans l'ouverture de tels marchés, ce qui, encore une fois, améliore la durabilité de la gestion du verre en comparaison avec le contexte de 2010. Il est toutefois important de ne pas tourner le dos à des recycleurs établis tel que l'usine montréalaise Owens-Illinois. En effet, si le prix des résidus de verre augmente en réponse à la demande des cimenteries, le verrier pourrait être dans l'incapacité de s'approvisionner en calcin. L'utilisation de matière secondaire est la clé de sa compétitivité (F. Carrier, entrevue, 21 février 2018). Cette hausse de prix pourrait donc être fatale pour cette importante industrie québécoise. À nouveau, un équilibre et une diversité des marchés seront cruciaux dans le développement de la gestion du verre au Québec.

6.1.4 Dimension sociale

La dernière dimension du DD s'intéresse à l'aspect social de la gestion du verre. Peu discuté dans les sections précédentes du présent essai, cet enjeu est pourtant central à la crise du verre. Cette dernière, très médiatisée depuis la fermeture de l'usine Klareco en 2013 et du marché asiatique des matières recyclables en 2017, inquiète de façon évidente une portion de la population. L'enfouissement de la majorité du verre issu des centres de tri peut décourager les citoyens à continuer leurs efforts de tri des matières résiduelles.

Comme mentionné précédemment, certains groupes citoyens et municipalités militent et s'engagent même à développer et soutenir des alternatives à la collecte sélective de porte à porte. Par exemple, le comité Opération verre-vert et le FCQGED militent en faveur d'une consigne étendue à tous les contenants de boissons alcoolisées. En revanche, les sociétés d'État et leurs partenaires, tels que RECYC-QUÉBEC, la SAQ et ÉEQ persistent à maintenir le statu quo à ce propos. Pourtant, la consigne permet des taux de recyclage plus élevés que la collecte sélective, notamment pour le verre. De plus, cette technique fournit

du verre à un prix acceptable pour le verrier Owens-Illinois. La consigne permet également de conscientiser les citoyens et à les motiver à gérer leurs matières recyclables, appliquant le principe de consommation responsable de la Loi, ainsi que celui de pollueur-payeur.

Le principe d'accès au savoir, pour sa part, est peu exploité en ce qui a trait à la gestion de la crise du verre. Par exemple, le FCQGED a dû se rendre aux tribunaux afin d'avoir accès à l'étude de faisabilité d'une consigne sur les contenants de boissons alcoolisées préparée par KPMG pour la SAQ. De plus, il est évident, à la suite de la rédaction du présent essai, qu'il est difficile d'obtenir des informations concernant, par exemple, les essais de la technologie Krysteline dans les centres de tri.

En ce qui a trait au principe de santé et qualité de vie de la Loi, aucune différence importante entre le contexte actuel et celui de 2010 ne semble exister. La gestion des résidus de verre ne présentait pas de problématique majeure à l'époque ni actuellement. Il est toutefois intéressant de rappeler que la poudre de verre est un matériau amorphe et que son utilisation, notamment dans le sablage par jet, est plus intéressante d'un point de vue sanitaire que celle d'un matériau cristallin comme le sable.

Enfin, le développement de nouveaux débouchés et marchés québécois pour la gestion des résidus de verre assure des emplois, notamment en recherche et développement. L'aboutissement de ces débouchés pourrait également permettre de développer plus d'emplois dans le domaine du recyclage. Il est toutefois important, comme mentionné dans la section sur la dimension économique, de ne pas favoriser la fermeture de l'usine Owens-Illinois qui emploie plus de 400 employés (McCarthy, 2015, 13 avril).

Pour conclure, l'aspect social de la gestion du verre au Québec ne présente actuellement pas d'amélioration notable en termes de durabilité. Il est possible que le dénouement de la crise puisse développer de nouveaux emplois.

6.2 Conclusions

Au terme des sous-sections précédentes, il est évident que la crise du verre approche de son dénouement. Selon les développements des dernières semaines et des derniers mois, il est possible que les débouchés à haute valeur ajoutée, tels que l'utilisation de PVM comme ajout cimentaire normalisé par la norme CSA A3000, puissent améliorer le sort du verre au Québec. Ces nouveaux débouchés, rendus possibles notamment par la micronisation du verre développée au Québec et lui conférant de nouvelles propriétés, ouvrent les portes à de nouveaux marchés. L'expansion de ceux-ci, justifiés par l'aspect écologique, post-consommation et local du verre, pourrait permettre de commercialiser ce produit de façon durable. En

assurant une diversité de produits de verre récupéré et de marchés, la pérennité du recyclage du verre pourrait être assurée, évitant de retomber dans une crise du verre semblable à celle vécue à la suite de la fermeture de l'usine de Klareco.

7. RECOMMANDATIONS POUR UNE GESTION DURABLE DU VERRE AU QUÉBEC

Il a été établi, à la section précédente, que le Québec est sur la voie de développer une gestion plus durable des résidus de verre en comparaison avec ce qui s'est fait au courant des dernières années. Toutefois, certains enjeux et limites doivent continuer à être considérés afin d'assurer la mise en place, la durabilité et la pérennité de cette gestion. Dans le dernier chapitre du présent essai, des recommandations sont émises afin de favoriser une connaissance plus élargie des enjeux du verre au Québec et la mise en place de la gestion durable du verre.

7.1 Recommandations sur les connaissances et l'accès au savoir

Depuis plusieurs années, RECYC-QUÉBEC fait un travail exemplaire pour produire des bilans de la GMR au Québec. Cependant, l'absence de certaines informations en lien avec le verre transpire du dernier rapport de la société d'État. Par exemple, la génération de verre se limite au secteur résidentiel. Pourtant, certains ICI tels que les restaurateurs et les hôteliers sont d'importants générateurs de contenants de verre. Il est donc recommandé de :

- Détailler, au sein des bilans de RECYC-QUÉBEC, les différents marchés de produits vendus dans des contenants de verre, et ce, afin de mettre en valeur la quantité de résidus de verre générés par le secteur des ICI;
- faire un suivi de la mise en marché des différents types de contenants, soit les contenants consignés (CRU et CRM) et les contenants non consignés, et ce, en fonction des secteurs qui achètent ces produits.

L'étude de faisabilité d'une consigne sur les contenants de vins et spiritueux la plus récente et qui a été rendue publique date de 12 ans. Or, certains groupes citoyens considèrent que cette méthode de gestion du verre résiduel pourrait permettre de régler la crise du verre actuelle. Les statistiques de taux de récupération des consignes québécoises appuient cette réflexion. De la même façon, les systèmes développés par les autres provinces canadiennes, et dont la plupart sont élargis à davantage de produits incluant les bouteilles de vin et spiritueux, présentent de bonnes performances. De plus les systèmes de consigne actuellement mis en place au Québec datent de plusieurs dizaines d'années. À la lumière de l'expérience accumulée par le Québec et les autres provinces, certains enjeux de la consigne pourraient être reconsidérés afin d'en améliorer la durabilité. De ce fait, il est recommandé de :

- réétudier le système de consigne dans son ensemble afin de déterminer les pratiques les plus durables et performantes;
 - analyser les avantages et les défis de l'élargissement du marché des CRM dans le but de respecter la hiérarchie des 3RV-E;
 - définir et rendre public le calcul du taux de récupération des CRM par la consigne privée afin de comprendre la performance très élevée de ce système;
 - comparer la qualité des résidus de verre issus de la consigne et de ceux issus des centres de tri équipés des nouvelles technologies faisant l'objet de projets pilotes. À qualité égale, considérer le coût associé aux deux systèmes;
 - considérer le retrait de la consigne sur les contenants d'aluminium afin d'éviter de priver les centres de tri québécois d'un profit assuré. Ces organisations sont d'une importance capitale au sein de la GMR au Québec et leur survie économique est primordiale;
- si la crise du verre persiste suite aux projets pilotes en centre de tri, reconsidérer, par le biais d'une étude de faisabilité qui sera rendue publique, la consigne sur les contenants de vins et spiritueux;
 - considérer la vente de la matière récupérée;
 - considérer le remplacement de la tarification sur la mise en marché d'emballages par l'implantation d'une consigne différentielle afin de financer le programme sans en augmenter le prix pour les consommateurs;
- le cas échéant, adapter le système de consigne actuel en fonction des pratiques les plus durables.

Malgré l'évolution des pratiques de la collecte sélective de porte à porte, certains éléments pourraient être améliorés afin d'augmenter les taux de récupération et de recyclage du verre. Il est donc recommandé de :

- financer, si elles sont pertinentes, des études de faisabilité au niveau municipal pour des systèmes parallèles de collecte du verre par apport volontaire. Cette technique a fait ses preuves à Saint-Denis-de-Brompton et pourrait rester pertinente dans certaines petites municipalités où la sensibilisation des citoyens est facile et efficace, assurant la pureté du produit récupéré;
- inclure l'ensemble des enjeux environnementaux dans les études de faisabilité. Par exemple, il serait intéressant de mesurer, approximer ou extrapoler les déplacements moyens associés aux dépôts des contenants, et ce en considérant la mutualisation de déplacements avec d'autres activités. Dans le cas de St-Denis-de-Brompton le conteneur à dépôt volontaire se trouve sur un

terrain municipal et la mutualisation de ce déplacement est moins évidente que s'il était placé sur le terrain d'une succursale de la SAQ ou d'un supermarché.

Enfin, plusieurs entreprises travaillent actuellement à développer une gestion durable du verre au Québec. Or, le citoyen moyen se fait répéter, notamment par le biais des médias, que le verre récupéré est recyclé à un très faible pourcentage. Il n'est pas faux de dire que ce message peut démobiliser une certaine part de la population qui, par conséquent, diminuera ses efforts de tri des matières résiduelles. Il est donc recommandé de :

- faire preuve de transparence en ce qui a trait aux développements de la gestion du verre au Québec.

7.2 Recommandations économiques et technologiques

L'usine montréalaise de fabrication de contenants de verre Owens-Illinois est un recycleur important du verre et, avec plus de 400 employés, elle se présente comme un rouage non négligeable de l'économie québécoise. Sa compétitivité est largement dépendante de sa capacité à s'approvisionner en calcin. Il est donc recommandé de :

- développer une gestion du verre favorisant la production de calcin à un coût compétitif;
- appuyer l'entreprise Owens-Illinois dans le développement de procédés qui permettent l'utilisation de verre mixte, notamment par la création d'un marché pour le verre gris.

La fermeture de l'usine Klareco est directement liée à un enjeu économique. Afin de ne pas répéter cette problématique et pour assurer la pérennité de la gestion du verre, il est recommandé de :

- continuer à développer des débouchés à valeur ajoutée du verre afin de pouvoir le vendre à un prix plus élevé;
- continuer à développer les technologies de micronisation afin de mettre en valeur les propriétés uniques de la PVM;
- encourager les discussions entre les centres de tri, les conditionneurs et les recycleurs potentiels afin de développer des marchés durables appuyés par des études de marché;
- s'assurer que les recycleurs potentiels, tels que les cimenteries, sont prêts à acheter la PVM à un prix permettant de rentabiliser les investissements privés et publics.

Considérant que la norme CSA A3000 normalise maintenant la PVM comme ajout cimentaire, et que ce débouché présente un avantage environnemental substantiel, il est recommandé de :

- développer le marché de la PVM en favorisant, au niveau municipal, l'utilisation d'ajouts cimentaires locaux et post-consommation.

7.3 Recommandations environnementales

Considérant que les avantages environnementaux du remplacement du ciment par de la PVM surpassent ceux des autres débouchés du verre, il est recommandé de :

- développer le marché des ajouts cimentaires dans des applications où les ajouts cimentaires ne sont pas encore utilisés. En effet, l'utilisation de la PVM dans des ouvrages contenant traditionnellement des cendres volantes ou de la fumée de silice n'est pas aussi intéressante d'un point de vue environnemental.

Considérant que plusieurs débouchés québécois existent et que le transport du verre émet des GES, il est recommandé de :

- prioriser la valorisation locale des résidus de verre si elle permet la durabilité économique de la gestion du verre;
- encourager la recherche et développement pour la valorisation de matériaux post-consommations, telle que la PVM, dans la fabrication de produits fabriqués au Québec.

CONCLUSION

Depuis la fermeture de l'usine Klareco à Longueuil en 2013, la gestion des résidus de verre au Québec s'est avérée doublement problématique. D'abord, le verre n'était recyclé, en 2015, qu'à un faible taux de 14 %. Ensuite, le verre des centres de tri contaminait les autres matières, diminuant leur valeur. Malgré les efforts de l'ensemble des acteurs impliqués dans la valorisation du verre, le verre persiste comme l'un des défis prioritaires de la GMR au Québec. Cette crise s'est intensifiée dans l'imaginaire québécois par la survenue d'un autre marasme dans le monde des matières récupérées : la fermeture, dès 2017, des marchés asiatiques pour l'achat de matières recyclable. La concomitance de ces deux crises a développé chez certains citoyens un état de perplexité à la limite du cynisme et de la démobilisation. Ce scepticisme populaire a été exacerbé par un certain manque de transparence de la part des responsables de la gestion du verre lors de leurs sorties médiatiques, et par une certaine incohérence entre leurs discours.

Toutefois, plusieurs signes semblent démontrer que les acteurs du verre réussiront bientôt à relancer la gestion du verre, si cela n'est déjà fait. Toutefois, il est pertinent de prendre du recul et d'analyser le contexte actuel afin d'identifier si le Québec s'enligne vers une gestion du verre plus durable qu'elle ne l'est actuellement, et qu'elle ne l'était avant la fermeture de l'usine Klareco en 2013.

Afin de répondre à cette question, le présent essai a d'abord décrit le verre. Son histoire et ses propriétés ont été présentées dans le but de comprendre ce matériau virtuellement recyclable à l'infini, ainsi que de saisir son potentiel comme matière résiduelle. La première section a également traité de la production de verre au Québec. Grâce à une entrevue avec le directeur de l'usine montréalaise Owens-Illinois, les besoins, les enjeux et les défis de cette industrie ont été révélés. Il a été établi que l'utilisation de verre recyclé de bonne qualité est cruciale à la compétitivité de l'usine, notamment face aux verriers asiatiques.

Le deuxième chapitre a présenté les différents enjeux des modes de gestion possibles des matières résiduelles : l'élimination, le recyclage et les méthodes de collecte, et le réemploi. Cette section a également rappelé que l'élimination présente des problématiques économiques, sociales et environnementales. Les défis de la collecte sélective et de la consigne ont aussi été présentés, soulignant que chaque matière présente des avantages et des défis. Par exemple, la collecte sélective du verre présente des enjeux dus à la contamination des autres matières ; la consigne pallie cette problématique. L'aluminium, pour sa part, est très simple à trier à la suite de la collecte de porte à porte, et sa récupération permet d'assurer un profit pour les centres de tri.

Dans le troisième chapitre ont été décrits les modes de gestion des résidus de verre mis en place au Québec et ailleurs. Les objectifs du Québec en termes de GMR ont été présentés au travers d'une revue des politiques de GMR. Ensuite, les systèmes de consigne ont été présentés. L'étude de faisabilité de l'implantation d'une consigne sur les vins et spiritueux, que KPMG a réalisée à la demande de la SAQ, a été analysée en fonction de l'état actuel, soit 12 ans après la publication de l'étude. Certains ajustements ont démontré qu'une consigne supplémentaire de 0,25 \$ permettrait possiblement d'implanter un système autofinancé, tout en permettant certains profits. Ensuite, les systèmes de consigne développés par les autres provinces et territoires ont été revus, démontrant que la consigne québécoise couvre une gamme de produits beaucoup plus limitée que les autres. Le troisième chapitre a également présenté la collecte sélective et ses taux de recyclage globaux relativement faibles pour le verre. Enfin, des exemples d'apport volontaire, une méthode de collecte sélective alternative et encore rare au Québec, ont montré que cette pratique pourrait être intéressante dans certaines petites municipalités.

Au cours du quatrième chapitre, les différents débouchés conventionnels du verre ont été présentés. L'avantage environnemental de chacun a été évalué, notamment en se basant sur l'ACV que Quantis a préparé pour RECYC-QUÉBEC. Cette analyse a permis d'appuyer l'idée que le recyclage du verre en nouvelles bouteilles de verre ou en laine de verre est très intéressant d'un point de vue environnemental. Cependant, aucune usine de fabrication de laine de verre n'existe au Québec, ce qui réduit son intérêt dû à la nécessité d'exporter le verre récupéré. Les autres débouchés, tels que le sable de filtration, le sablage par jet ou la valorisation du verre dans les LET, présentent des avantages environnementaux moins intéressants.

Au cinquième chapitre figurent les innovations dans le domaine du recyclage du verre. La technologie Krysteline, mise à l'essai dans cinq centres de tri, a été présentée comme étant une nouvelle méthode de tri et de purification du verre. Les rapports les plus récents estimeraient à plus de 98 % la pureté du verre issu de cette technologie. Ensuite, la micronisation a été exposée comme un conditionnement du verre permettant de lui conférer des avantages intéressants tels que sa réactivité pouzzolanique. Cette section a également traité de la PVM comme ajout cimentaire. Il a été démontré que cette application peut être considérée comme un débouché à valeur ajoutée du verre puisque son avantage environnemental est supérieur aux autres applications. De plus, ce matériau peut être utilisé dans les bâtiments LEED et peut permettre aux cimenteries d'augmenter le prix de leurs mélanges de ciment. Enfin, la norme CSA A3000 qui normalise l'utilisation d'ajouts cimentaires, et qui a nouvellement inclus la PVM, a été présentée comme un levier pour développer le marché de ce matériau.

Au cours du chapitre 6, le concept de DD a été utilisé afin de répondre à la question posée dans le titre de l'essai. Environnementalement parlant, le Québec est sur la bonne voie pour développer des débouchés durables du verre. Il est toutefois primordial que la vente de ce matériau permette de financer les investissements et les opérations des centres de tri et des conditionneurs. Pour ce faire, il a été démontré que le Québec peut développer des débouchés à valeur ajoutée, notamment en conférant de nouvelles propriétés au verre grâce à la micronisation. Ce chapitre a été établi que la communauté impliquée dans la gestion du verre au Québec est diversifiée et qu'elle favorise le développement de technologies et de débouchés durables pour la gestion du verre.

Enfin, le chapitre 7 du présent essai concrétise certaines réflexions et observations sous forme de recommandations. Ces dernières ont pour but de continuer à considérer l'ensemble des enjeux des résidus de verre au Québec afin de développer une gestion durable de cette matière.

Au moment d'écrire ces lignes, le dossier de la gestion du verre reste très dynamique, tout en restant voilé d'une certaine confusion. À titre d'exemple, le 22 mai 2018, l'organisme Protégez-Vous publiait un article posant la question suivante : « Faut-il consigner les bouteilles de la SAQ ? » (Leroux, 2018, 22 mai). Quelques jours plus tard, la SAQ se disait ouverte à un système de consigne sur les bouteilles de vins et spiritueux (Couture, 2018, 25 mai). Cette même semaine, il était annoncé que les projets pilotes du plan Verre l'innovation permettaient d'obtenir des résidus de verre purs à plus de 98 % à sa sortie des centres de tri. Les cinq usines visées par le projet pilote auraient permis de faire passer le taux de recyclage du verre de 14 à 50 %. (CNW Telbec, 2018, 25 mai) Enfin, le matin même, la ministre Isabelle Melançon du MDDELCC confirmait à la radio du 98,5 FM que le plan Verre l'innovation avait permis de produire du verre de bonne qualité et que de débouchés existaient. Pendant la même entrevue, elle ne ferme toutefois pas la porte face à la possibilité de revoir le système de consigne. (Arcand, 2018)

Malgré l'analyse développée au cours du présent essai concernant l'état actuel de la gestion du verre, il faudra assurément attendre la fin de la période d'essai des nouvelles technologies en centres de tri avant de répondre définitivement à la question fondamentale du présent essai. Si les centres de tri ne réussissent pas à produire du verre assez pur pour répondre aux besoins des conditionneurs et recycleurs, il sera pertinent d'étudier différentes méthodes de récupération, telle que la consigne. Toutefois, s'ils réussissent à produire du verre d'une pureté suffisante pour assurer son recyclage, le Québec sera assurément sur la bonne voie. Cette matière permettra aux conditionneurs et aux recycleurs de développer et diversifier les débouchés à valeur ajoutée, assurant une gestion du verre plus durable.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). (2014). *Étude prospective sur la collecte et le tri des déchets d'emballages et de papier dans le service public de gestion des déchets*. Repéré à http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/adm00013578_etude_prospective_collecte_tri.pdf
- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). (2016a). Collecte en apport volontaire. Repéré à <http://www.ademe.fr/expertises/dechets/quoi-parle-t/prevention-gestion-dechets/dossier/collecte/collecte-apport-volontaire>
- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). (2016b). Collecte en déchèteries. Repéré à <http://www.ademe.fr/expertises/dechets/quoi-parle-t/prevention-gestion-dechets/dossier/collecte/collecte-decheteries>
- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). (2016c). Collecte en porte-à-porte. Repéré à <http://www.ademe.fr/expertises/dechets/quoi-parle-t/prevention-gestion-dechets/dossier/collecte/collecte-porte-a-porte>
- Agence QMI. (2017, 9 décembre). Une consigne sur les bouteilles de vin et spiritueux. *TVA Nouvelles*. Repéré à <http://www.tvanouvelles.ca/2017/12/09/une-consigne-sur-les-bouteilles-de-vin-et-spiritueux>
- Amato, I. (1997). *Stuff : the materials the world is made of*. New York, NY : Avon Books, Inc.
- Ambioterra. (2008). *Le projet d'agrandissement du lieu d'enfouissement technique de Lachenaie : un cas d'injustice environnementale et sociale*. Repéré à <http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/LET-Lachenaie/documents/DM28.pdf>
- André Simard et associés. (2006). *Étude portant sur la problématique des lieux d'enfouissement technique pour l'élimination des résidus ultimes de l'agglomération de Montréal*. Repéré à https://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/ENVIRO_FR/MEDIA/DOCUMENTS/13.etude_li eux_enfouissement_technique_1.PDF
- Arcand, P. (animateur). (2018). Crise du recyclage : quel est le plan du gouvernement pour éviter que nos matières recyclables se retrouvent au dépotoir? [Entrevue avec la ministre de l'environnement Isabelle Melançon]. *Puisqu'il faut se lever*. Montréal, Québec : Cogeco Média.
- Ashby, M., Shercliff H., et Cebon, D. (2013). *Matériaux : ingénierie, science, procédé et conception* (1^{ère} éd.). Lausanne, Suisse : Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Asahi India Glass Limited. (2017). Glass manufacturing process. Repéré à <https://www.aisglass.com/glass-manufacturing-process>
- Association des brasseurs du Québec (ABQ). (2008). *Mémoire de l'Association des brasseurs du Québec*. Repéré à http://www.assnat.qc.ca/Media/Process.aspx?MediaId=ANQ.Vigie.BII.DocumentGenerique_499&process=Default&token=ZyMoxNwUn8ikQ+TRKYwPCjWrKwg+vIv9rjij7p3xLGTZDmLVSmJLoqe/vG7/YWzz

- Association des brasseurs du Québec (ABQ). (2018). Pionniers de la consigne au Québec. Repéré à <https://brasseurs.qc.ca/engagement-responsable/pionniers/>
- Association des brasseurs du Québec (ABQ). (s. d.). *La consigne : un système primordial dans le développement durable de l'industrie de la bière au Québec*. Repéré à http://www.hec.ca/developpement_durable/evenements_passes/consigne_brasseurs_qc.pdf
- AVCalc LLC. (2018). Volume to weight conversion. Repéré à <https://www.aqua-calc.com/calculate/volume-to-weight>
- Baïlon, J.-P., Dorlot, J.-M., Haenny, L., Masounave, J. et Rigaud, M. (1980). *Des matériaux*. Montréal, Québec : Édition de l'École Polytechnique de Montréal.
- Banque du Canada. (2018). Inflation calculator. Repéré à <https://www.bankofcanada.ca/rates/related/inflation-calculator/>
- Bélanger, Y. (2016, 1^{er} août). « Saint-Bruno fait fausse route ». *Les Versants*. <http://www.versants.com/saint-bruno-fait-fausse-route/>
- Béton Provincial. (2017). Ciment : Les ciments de Tercim, une entreprise 100% québécoise. Repéré à <http://www.betonprovincial.com/ciments-tercim>
- BFI Canada. (s. d.). *Distribution des plaintes par secteur et par année, septembre 2003 à septembre 2007*. Repéré à <http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/LET-Lachenaie/documents/DA30.pdf>
- Bio Intelligence Service, AJI-Europe et BP2R. (2012). *Transport et logistique des déchets : Enjeux et évolutions du transport et de la logistique des déchets*. Repéré à <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/7695-transport-des-dechets-etude.pdf>
- Bio Intelligence Service et LET - Lyon 2. (2014). *La collecte et le transport des produits usagés et des déchets dans une optique de logistique inverse : État des connaissances et propositions méthodologiques*. Repéré à https://www.record-net.org/storage/etudes/12-0144-1A/rapport/Rapport_record12-0144_1A.pdf
- Bourdages, N. (2007). *Historique des plaintes concernant BFI rapportées à la direction générale*. Repéré à <http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/LET-Lachenaie/documents/DB5.pdf>
- Bouzoubaâ, N., Fournier, B. (2005). Current situation with the production and use of supplementary cementitious materials (SCMs) in concrete construction in Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(1), 129-143. Repéré à <http://www.nrcresearchpress.com/doi/pdf/10.1139/I04-109>
- British Glass Manufacturers Confederation. (2013). History of Glass. Repéré à <https://www.britglass.org.uk/history-of-glass>
- Buist, M.-È., Cissé, I., Criner, G., Dubé, J., Gauthier, F., González, P., Journeault, M., Trabelsi, S. West, G. E. (2015). *Étude comparative des systèmes de récupération des contenants de boisson au Québec*. Repéré à http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/matieres/valorisation/Rapport_final-CREATE.pdf

Bureau, C. (2015, 22 juin). Un conteneur spécialement dédié au verre installé à St-Denis. *laTribune*. Repéré à <https://www.latribune.ca/archives/un-conteneur-specialement-dedie-au-verre-installe-a-st-denis-84aac84c3d6e177bee2f3cb068c8861d>

Bussièrès, I. (2013, 29 juillet). Usine de recyclage fermée : une montagne de verre prend la poussière. *leSoleil*. Repéré à <https://www.lesoleil.com/actualite/environnement/usine-de-recyclage-fermee-une-montagne-de-verre-prend-la-poussiere-041d4b3f44c78b3e369becd4908ca971>

Caillou, A. (2017, 5 septembre). Le verre, la bête noire du recyclage au Québec. *Le Devoir*. Repéré à <https://www.ledevoir.com/societe/environnement/507237/le-verre-la-bete-noire-du-recyclage-au-quebec>

Cement Association of Canada. (2018). Codes et normes. Repéré à <http://www.cement.ca/fr/codes-et-normes/>

Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG). (2010). *Rapport final : Analyse du cycle de vie de contenants de bière au Québec*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/acv-contenants-biere.pdf>

Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG). (2015). *Rapport final : Mise à jour d'une analyse du cycle de vie de contenants de bière au Québec*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/acv-contenants-biere-rapport-2015.pdf>

Certex. (2018). Trouver le point de chute le plus près de chez vous. Repéré à <http://www.certexcanada.com/fr/trouvez-une-boite/locators/map>

Chamard, J.-L. et Méthot, J. (s. d.). *Réseau Environnement, 50 ans au service de la gestion des matières résiduelles*. Repéré à <http://www.reseau-environnement.com/wp-content/uploads/2016/04/Dossier-MR.pdf>

Chekireb, S. (2015). *Valorisation de la poudre de verre dans le béton autoplaçant* (Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec). Repéré à http://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/7597/Chekireb_Sihem_MScA_2015.pdf;sequence=1

Chicago Metropolitan Agency for Planning (CMAP). (2018). Impacts of Municipal Solid Waste. Repéré à <http://www.cmap.illinois.gov/about/2040/supporting-materials/process-archive/strategy-papers/waste-disposal/impacts>

Citizen Communications, LLC. (2018a). Dishes and ceramics. Repéré à <http://www.keeptruckeegreen.org/guide/dishes/>

Citizen Communications, LLC. (2018b). Pyrex. Repéré à <http://www.keeptruckeegreen.org/guide/pyrex/>

CNW Telbec. (2018, 25 mai). Projets pilotes d'expérimentation de recyclage du verre au Québec – Des premiers résultats extrêmement encourageants. *Cision*. Repéré à <https://www.newswire.ca/fr/news-releases/projets-pilotes-d-experimentation-de-recyclage-du-verre-au-quebec---des-premiers-resultats-extremement-encourageants-683717281.html>

- Condensil. (2008). La fumée de silice. Repéré à http://www.condensil.com/fre_FR/presentation
- Conseil régional de l'environnement de Montréal. (2012a). Gestion des déchets à Montréal. Repéré à <http://www.cremtl.qc.ca/publication/entrevues/2007/gestion-dechets-montreal>
- Conseil régional de l'environnement de Montréal. (2012b). Recyclage du verre : pas si simple. Repéré à <http://www.cremtl.qc.ca/publication/entrevues/2015/recyclage-verre-pas-si-simple>
- Côté, C. (2013, 27 avril). Dur coup pour le recyclage de verre : La principale usine du Québec ferme ses portes. *La Presse+*. Repéré à http://plus.lapresse.ca/screens/43ea-57b8-517aa8fb-ac02-6435ac1c606a__7C__0.html
- Couture, P. (2018, 25 mai). La SAQ prête à se plier à une consigne si Québec l'impose. *TVA Nouvelles*. Repéré à <http://www.tvanouvelles.ca/2018/05/25/la-saq-prete-a-se-plier-a-une-consigne-si-quebec-limpose-1>
- CM Consulting. (2014). *Who pays what : An analysis of beverage container collection and costs in Canada*. Repéré à <http://www.cmconsultinginc.com/wp-content/uploads/2014/07/WPW2014.pdf>
- CM Consulting. (2016). *Deposit systems for one-way beverage containers : Global Overview*. Repéré à <http://www.cmconsultinginc.com/wp-content/uploads/2017/05/BOOK-Deposit-Global-24May2017-for-Website.pdf>
- Corbitt, R. A. (1990). *Standard handbook of environmental engineering*. New York, NY : McGraw-Hill, Inc.
- Cotton, F. A., Wilkinson, G., Gaus, P. L. (1995). *Basic inorganic chemistry* (5^e éd.). Toronto, Ontario : John Wiley & Sons, Inc.
- CRH Canada Group Inc. (2017). Ciment Portland au calcaire. Repéré à <http://www.crhcanada.com/fr/solutions-innovantes/le-ciment-contempra>
- Crouch, L.K., Hewitt, R. et Byard, B. (2007). *High volume fly ash concrete*. Repéré à <http://www.flyash.info/2007/2crouch.pdf>
- CSA Group (2015). CAN/CSA-A3000-13 – Cementitious materials compendium. Repéré à <http://shop.csa.ca/en/canada/concrete/canca-a3000-13/invt/27020212013>
- CSA Group. (2018). Construction et infrastructure. Repéré à <https://www.csagroup.org/codes-standards/construction-infrastructure/>
- De Belie, N., Soutsos, M. et Gruyaert, E. (2017). *Properties of fresh and hardened concrete containing supplementary cementitious materials: State-of-the-art report of the RILEM technical committee 238-SCM, Working Group 4*. https://books.google.ca/books?id=qFxCdWAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=fr&source=gbg_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- DeFord, D. (2016). *Evaluation of pozzolanic materials for replacement of fly ash in FDOT concrete*. Repéré à <http://www.fdot.gov/materials/structural/meetings/fdot-ccf/2016/appendixa.pdf>

- Desplanques, A. C. (2018, 5 février). Bientôt un point de dépôt pour le verre à Saint-Lambert. *Le Journal de Montréal*. Repéré à <http://www.journaldemontreal.com/2018/02/05/bientot-un-point-de-depot-pour-le-verre-a-saint-lambert>
- Dionne, K., Simard, A., Drapeau, J.-B. (2006). *Étude sur la problématique des lieux d'enfouissement technique pour l'élimination des résidus ultimes de l'agglomération de Montréal*. Repéré à https://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/ENVIRO_FR/MEDIA/DOCUMENTS/13.etude_lieux_enfouissement_technique_1.PDF
- Direction des politiques de la qualité de l'atmosphère, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). (2015). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2013 et leur évolution depuis 1990*. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/ges/2013/Inventaire1990-2013.pdf>
- Dryden Aqua. (2017). AFM® Activated Filter Material. Repéré à <https://www.drydenaqua.com/afm>
- Duplessis Piché, K. (2012, 6 novembre). Des bouteilles plus légères à la SAQ. *La Presse*. Repéré à <http://www.lapresse.ca/vins/actualites/201211/06/01-4590765-des-bouteilles-plus-legeres-a-la-saq.php>
- Eco-Emballages. (2015). La collecte sélective en 2015 : Apport volontaire, séparation des flux et harmonisation des couleurs. Repéré à <http://www.ecoemballages.fr/actualite/la-collecte-selective-en-2015-apport-volontaire-separation-des-flux-et-harmonisation-des>
- Eco-Emballages. (2016). *Les dispositifs de collecte en France*. Repéré à <http://www.ecoemballages.fr/sites/default/files/files/Dispositifs%20de%20collecte.pdf>
- Éco Entreprises Québec (ÉEQ). (2016). *Plan Verre l'innovation de ÉEQ : Cinq centres de tri testeront de nouveaux équipements de pointe pour le traitement du verre*. Repéré à http://www.eeq.ca/wp-content/uploads/14-11-2016_communique_vff.pdf
- Éco Entreprises Québec (ÉEQ). (2018a). Le tarif : déterminer son assujettissement à la loi et comprendre l'étendue de ses obligations. Repéré à <http://www.eeq.ca/pour-les-entreprises/declaration-de-lentreprise/tarification/>
- Éco Entreprises Québec (ÉEQ). (2018b). Plan Verre l'innovation : une nouvelle ère pour le recyclage du verre. Repéré à <http://www.eeq.ca/le-bac-de-recuperation-un-modele-deconomie-circulaire/initiatives/plan-verre-linnovation/>
- Éco Entreprises Québec (ÉEQ). (s. d.). *Le marché du verre de filtration de l'eau des piscines*. Repéré à http://www.eeq.ca/wp-content/uploads/2_fiche_filtration_eau_piscine_vff.pdf
- Éco Entreprises Québec (ÉEQ) et RECYC-QUÉBEC. (2015). *Rapport synthèse : Caractérisation des matières résiduelles du secteur résidentiel 2012-2013*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/carac-2012-2013-rapport-synthese.pdf>
- Eco-Friendly Flooring. (2018a). Glass tile gallery. Repéré à <http://ecofriendlyflooring.com/gallery/glass-tile-gallery/>

- Eco-Friendly Flooring. (2018b). Recycled glass tiles FAQ. Repéré à <http://ecofriendlyflooring.com/product-category/tile/recycled-glass-tile/>
- Écohabitation. (2012). Le point sur le béton à contenu recyclé. Repéré à <http://www.ecohabitation.com/actualite/nouvelles/point-beton-contenu-recycle>
- ECOsmarte Planet Friendly, Inc. (2017). Welcome to ECOsmarte®. Repéré à <http://www.ecosmarte.com/>
- Ekotex. (2015). Postes de dons. Repéré à <http://ekotex.ca/la-collecte/postes-de-dons/>
- Encyclopædia Britannica, Inc. (2018a). Obsidian. Repéré à <https://www.britannica.com/science/obsidian>
- Entraide Diabétique du Québec. (2018). Boîtes de dons. Repéré à <http://www.entraidediabetique.org/boites-de-dons/>
- Environment and Climate Change Canada (ECCC). (2017a). *Canadian environmental sustainability indicators : Greenhouse gas emissions*. Repéré à https://www.canada.ca/content/dam/eccc/migration/main/indicateurs-indicators/f60db708-6243-4a71-896b-6c7fb5cc7d01/ghgemissions_en.pdf
- Environment and Climate Change Canada (ECCC). (2017b). *Overview of 2015 reported emissions*. Repéré à https://www.ec.gc.ca/ges-ghg/82BA1E22-9653-45F1-8EC2-9BF8A2151555/ECCC_GHGRP_OverviewOfReported2015Emissions.pdf
- Environment Canada. (2015). *National Inventory Report – Greenhouse gas sources and sinks in Canada*. Repéré à http://publications.gc.ca/collections/collection_2016/eccc/En81-4-2013-2-eng.pdf
- Enviros Consulting Ltd. (2003). *Glass recycling : Life cycle carbon dioxide emissions*. Repéré à http://www.packagingfedn.co.uk/images/reports/Enviros_Report.pdf
- Équiterre. (2014). Béton et poudre de verre : une innovation québécoise qui pourrait réduire les GES de 20 %. Repéré à <https://equiterre.org/communiquer/beton-et-poudre-de-verre-une-innovation-quebecoise-qui-pourrait-reduire-les-ges-de-20>
- Environnement Québec. (s. d.) *Inventaire québécois des gaz à effet de serre 1990-2000*. Repéré à <http://www.mdelcc.gouv.qc.ca/changements/ges/depliant-ges.pdf>
- ESCA Industrie, Ltd. (s. d.). Media – Crushed Glass. Repéré à <https://www.escablast.com/blast-media/crushed-glass/>
- Étienne, S., Laurent, D., Gaudry, É., Lagrange, P., Ledieu et J., Steinmetz, J. (2008). *Les matériaux de A à Z : 300 entrées et des exemples pour comprendre*. Paris, France : Dunod.
- European insulation Manufacturers Association (Eurima). (s. d.). Production process. Repéré à <https://www.eurima.org/about-mineral-wool/production-process.html>
- Front commun québécois pour une gestion écologique des déchets (FCQGED). (2016). *Coûts de la consigne des contenants de boissons alcooliques : Analyse du document préparé par KPMG pour la société des alcools du Québec*. Repéré à http://www.fcqed.org/wp-content/uploads/2017/05/Analyse_de_l_etude_de_KPMG_pour-la_SAQ.pdf

- Friends of Glass et Verre Avenir. (2016). *Le recyclage du verre d'emballage progresse et innove*. Repéré à http://www.verre-avenir.fr/var/plain_site/storage/original/application/07db667a46f3d1c39308466fa1dc6e10.pdf
- Gapinski, G. M., Scanlon, J. (s. d.). *Silica Fume*. Repéré à <http://www.norchem.com/pdf/technical-papers-articles-gapinski-scanlon.pdf>
- Genois Gagnon, J.-M. (2015, 29 mai). Consigne des bouteilles : la SAQ ne veut pas plier devant la pression. *Le Soleil*. Repéré à <https://www.lesoleil.com/affaires/consigne-des-bouteilles-la-saq-ne-veut-pas-plier-devant-la-pression-b0f9d686244d7878da33c2519e4f54ac>
- GlassBlast. (s. d.). About us. Repéré à <https://www.glassblast.com/about-us/>
- Glass Alliance Europe. (2015). Sustainability & the environment. Repéré à <https://www.glassallianceeurope.eu/en/environment>
- Glass Packaging Institute. (2018a). Learn about glass. Repéré à <http://www.gpi.org/learn-about-glass/what-glass/glass-composition>
- Glass Packaging Institute. (2018b). Recycling. Repéré à <http://www.gpi.org/recycling/glass-recycling-facts>
- Gouvernement du Canada. (2014). Gaz à effet de serre et des déchets solides municipaux. Repéré sur le site d'Environnement et Changements climatiques Canada, section Explorer les sujets – Pollution et déchets – La gestion et la réduction de nos déchets – Déchets solides municipaux : <https://www.ec.gc.ca/gdd-mw/default.asp?lang=Fr&n=6F92E701-1>
- Gouvernement du Canada. (2018a). Annual statistics of mineral production. Repéré à <http://sead.nrcan.gc.ca/prod-prod/ann-ann-eng.aspx>
- Gouvernement du Canada. (2018b). Coal phase-out : the Powering Past Coal Alliance. Repéré à <https://www.canada.ca/en/services/environment/weather/climatechange/canada-international-action/coal-phase-out.html>
- Gouvernement du Québec. (2015). Population du Québec, 1971-2017. Repéré à http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/population-demographie/structure/qc_1971-20xx.htm
- Gouvernement du Québec. (2018a). Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008 (suite). Repéré à <http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/politique1998-2008/parties1-4.htm#2-principe>
- Gouvernement du Québec. (2018b). Redevances pour l'élimination de matières résiduelles. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/matieres/redevances/index.htm>
- Hermann, K. (1995). *Les ajouts: les cendres volantes*. Repéré à <https://www.e-periodica.ch/cntmng?pid=bci-001:1995:63::132>
- Hubert, M., Faber, A. (2014). On the structural role of boron in borosilicate glasses. *European Journal of Glass Science and Technology*, 55, 136-158.

- Institut Géopolymère. (2006). *Ciment et béton romain haute performance, bâtiment durable et résistant*. Repéré à <https://www.geopolymer.org/fr/archeologie/ciment-romain/ciment-et-beton-romain-haute-performance-batiment-durable-et-resistant/>
- International Programme on Chemical Safety (IPCS). (2016a). Cristobalite. Repéré à http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=0809
- International Programme on Chemical Safety (IPCS). (2016b). Quartz. Repéré à http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=0808
- International Programme on Chemical Safety (IPCS). (2016c). Tridymite. Repéré à http://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_card_id=0807
- Joint Research Centre. (2013). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass*. Repéré à <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC78091/lfn25786enn.pdf>
- Kachanova, V. (2014). *Les écocentres québécois : Portrait et recommandations pour le réseau de deuxième génération* (Mémoire de maîtrise). Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec.
- Kopp Glass. (2016). *The properties of glass*. Repéré à http://go.koppglass.com/hubfs/Resource_Downloads/glass_properties_ebook_Kopp_Glass_062916.pdf?t=1516865548863&utm_campaign=Glass%20Properties%20eBook&utm_source=hs_automation&utm_medium=email&utm_content=31055150&_hsenc=p2ANqtz-_J5_RDqVe7NUcsJTceCZpOjMy73igMYm2oC2Yzyq55OqaFBV6MhUi5Yp_Ha665eHvXYy8cKriz5_MLa8tJuTM8MA-Q0_0xXyJMuiJwhDMzmYEBKIU&_hsmi=31055150
- KPMG. (2006). *Coûts de la consigne des contenants de boissons alcooliques*. Repéré à https://www.bibliotheque.assnat.qc.ca/DepotNumerique_v2/AffichageFichier.aspx?idf=170443
- Krysteline Group Ltd. (2018). Machines. Repéré à <http://www.krysteline.com/machines/>
- Lafarge. (2018). Fly ash. Repéré à <https://www.lafarge.ca/en/fly-ash>
- LafargeHolcim France. (2018). Fabrication du ciment. Repéré à <https://www.lafarge.fr/fabrication-du-ciment>
- Laroche Paquet, R. (2015). *Optimiser la récupération, le tri et la commercialisation des matières recyclables au Québec* (Essai de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec). Repéré à https://www.usherbrooke.ca/environnement/fileadmin/sites/environnement/documents/Essais_2015/Laroche_Paquet_Roxane_MEnv_2015.pdf
- Le gouvernement du Nouveau-Brunswick. (2018). Fonds en fiducie pour l'environnement. Repéré à http://www2.gnb.ca/content/gnb/fr/services/services_render.13136.Fonds_en_fiducie_pour_l_environnement.html
- Le gouvernement du Nouveau-Brunswick. (s. d.). *Programme de gestion des récipients à boisson du Nouveau-Brunswick : Maintien du succès*. Repéré à

<http://www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/env/pdf/LandWaste-TerreDechets/MaintienDuSucces.pdf>

Lemieux, C. (2018, 28 février). Comité du verre – Le dépôt volontaire du verre, c’est possible, nous le prouvons! *Le Saint-Denisien*. Repéré à <http://www.lesaintdenisien.ca/communautaire/comite-verre-depot-volontaire-verre-cest-possible-prouvons/>

Lenntech B. V. (1980). Glass. Repéré à <https://www.lenntech.com/glass.htm>

Leroux, R. (2018, 22 mai). Faut-il consigner les bouteilles de la SAQ? *Protégez-Vous*. Repéré à <https://www.protegez-vous.ca/Maison/Faut-il-consigner-les-bouteilles-de-la-SAQ>

Les Métaux Canadiens. (2017). Projet. Repéré à <http://www.canadianmetalsinc.com/fr/projet/>

Lessard, J.-M. (2016). *Optimisation des cendres volantes et grossières de biomasse dans les bétons compactés au rouleau et dans les bétons moulés à sec*. (Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec). Repéré à https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/8831/Lessard_Jean_Martin_MScA_2016.pdf?sequence=6&isAllowed=y

Lewis, D. W. (1981). *History of slag cements*. Repéré à http://www.nationalslag.org/sites/nationalslag/files/documents/nsa_181-6_history_of_slag_cements.pdf

Les Conteneurs Semi-Enfouis TOTEM. (2017). Notre gamme conteneurs semi-enfouis TOTEM®. Repéré à <http://www.totemconteneurs.com/produits/conteneurs-semi-enfouis/>

Lockwood, A. H. (s. d.). *Ash in lungs : How breathing coal ash is hazardous to your health*. Repéré à <http://www.psr.org/assets/pdfs/ash-in-the-lungs.pdf>

Loh, Z. H., Samanta, A. K., Heng, P. W. S. (2015). Overview of milling techniques for improving the solubility of poorly water-soluble drugs. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 10(4), 255-274. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1818087615000100>

Loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte, Légisfrance.gouv.fr, 2015-992

Loi sur la qualité de l’environnement, RLRQ, c. Q-2.

Loi sur la taxe de vente du Québec, RLRQ, c. T-0.1.

Loi sur la vente et la distribution de bière et de boissons gazeuses dans des contenants à remplissage unique, RLRQ, c. V-5.001.

Loi sur le développement durable, RLRQ, c. D-8.1.1

Loi sur les alcools, L.R.O., c. L.18.

Loi sur les récipients à boisson, Lois du Nouveau-Brunswick, c. C-38.1.

- Lupien, C. (2006). *Projet pilote de valorisation du verre récupéré dans la construction de chaussées*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/projet-pilote-valorisation-verre-recup.pdf>
- Machinex. (2017). *MRF glass clean up*. Repéré à https://www.machinexrecycling.com/wp-content/uploads/2017/11/Machinex-Glass-Recycling_-Oct-2017_final.pdf
- Machinex. (2018a). *Étude de cas*. Repéré à https://www.machinexrecycling.com/wp-content/uploads/2018/01/EEQ_EBI_FR.pdf
- Machinex. (2018b). *Étude de cas*. Repéré à https://www.machinexrecycling.com/wp-content/uploads/2018/01/EEQ_RITMRG_FR.pdf
- Machinex. (2018c). *Étude de cas*. Repéré à https://www.machinexrecycling.com/wp-content/uploads/2018/01/EEQ_VIA-QC_FR.pdf
- Mairie de Paris. (2018). Mieux trier avec le Paris du tri! Repéré à <https://www.paris.fr/parisdutri>
- McCarthy, R. (2015, 13 avril). Un fabricant d'emballages en verre au Québec accueille favorablement une étude confirmant les avantages du recyclage des bouteilles dans la province. *CNW Telbec*. Repéré à <https://www.newswire.ca/fr/news-releases/un-fabricant-demballages-en-verre-au-quebec-accueille-favorablement-une-etude-confirmant-les-avantages-du-recyclage-des-bouteilles-dans-la-province-517438691.html>
- Miller, S. A. (2018). Supplementary cementitious materials to mitigate greenhouse gas emissions from concrete: can there be too much of a good thing? *Journal of Cleaner Production*, 178, 785-598. Repéré à <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0959652618300088>
- MilliPORE SiGMA. (2018a). Calcium carbonate. Repéré à <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/substance/calciumcarbonate1000947134111?lang=fr®ion=CA>
- MilliPORE SiGMA. (2018b). Calcium oxide. Repéré à <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/substance/calciumoxide5608130578811?lang=fr®ion=CA>
- MilliPORE SiGMA. (2018c). Carbon dioxide. Repéré à <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/295108?lang=fr®ion=CA>
- MilliPORE SiGMA. (2018d). Silicon dioxide. Repéré à <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/substance/silicondioxide60086067686011?lang=fr®ion=CA>
- MilliPORE SiGMA. (2018e). Sodium carbonate. Repéré à <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/sial/s7795?lang=fr®ion=CA>
- MilliPORE SiGMA. (2018f). Sodium oxide. Repéré à <https://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/645613?lang=fr®ion=CA>

- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). (2016). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2014 et leur évolution depuis 1990*. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/changements/ges/2014/Inventaire1990-2014.pdf>
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). (2009). Guide pour la prise en compte des principes de développement durable. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/developpement/outils/guide-principesdd.pdf>
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). (2010). Hiérarchie des modes de gestion des matières résiduelles et reconnaissance d'opérations de traitement en tant que valorisation énergétique. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/matieres/regime-compensation/hierarchie-modesgmr.pdf>
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). (s. d.). *Politique québécoise de gestion des matières résiduelles : Plan d'action 2011-2015*. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/matieres/pgmr/plan-action.pdf>
- Minnesota Pollution Control Agency. (s. d.). Glass as road aggregate. Repéré à <https://www.pca.state.mn.us/waste/glass-road-aggregate>
- Monaghan, G. (2017). Concrete chemistry and protective coatings. *Coatings World*, 22(7), 96-100. Repéré à https://www.coatingsworld.com/issues/2017-07-01/view_features/concrete-chemistry-and-protective-coatings
- Moroz, T. (2014, 9 janvier). The facts about the Ontario deposit return program. *CNW*. Repéré à <https://www.newswire.ca/news-releases/the-facts-about-the-ontario-deposit-return-program-513534431.html>
- Musée canadien de l'histoire. (s. d.). Le verre naturel. Repéré à <http://www.museedelhistoire.ca/cmcc/exhibitions/hist/verre/venat01f.shtml>
- North American Insulation Manufacturers Association (NAIMA). (2016). *Fiber glass insulation industry : A leading user of recycled glass*. Repéré à <http://insulationinstitute.org/wp-content/uploads/2016/04/Recycled-Glass-Flyer-April-2016.pdf>
- Observatoire Régional des Déchets d'Île-de-France (ORDIF). (2017). Atteindre les objectifs déchets de la loi de transition énergétique : est-ce que ça vaut le "coût"? Repéré à <http://www.ordif.com/agenda/atteindre-les-objectifs-dechets-de-la-loi-de-transition-energetique-est-ce-que-ca-vaut-le>
- Olivier, M. (2015). *Matières résiduelles et 3RV-E : Bâtir l'économie circulaire* (2^e éd.). Saint-Robert, Québec : Lab Éditions.
- Olivier, J., Janssens-Maenhout, G., Muntean, M., and Peters, J. (2015). *Trends in global CO₂ emissions : 2015 Report*. Repéré à http://edgar.jrc.ec.europa.eu/news_docs/jrc-2015-trends-in-global-co2-emissions-2015-report-98184.pdf
- Olivier, M. J. (2009). *Chimie des l'environnement* (6^e éd.). Lévis, Québec : Les productions Jacques Bernier

- Owens-Illinois. (2018a). From earth's natural elements – O-I glass. Repéré à <http://www.o-i.com/Why-Glass/How-Glass-Is-Made/>
- Owens-Illinois. (2018b). Product solutions. Repéré à <http://www.o-i.com/Product-Solutions/>
- Owens-Illinois, Inc. (2014). *The most sustainable package on Earth : Owens-Illinois, Inc. 2014 sustainability report*. Repéré à http://www.o-i.com/uploadedFiles/Content/Sustainability/O-I-SustainabilityREPORT_FASingle.pdf
- Pavie, H. (2014). Nos bouteilles transformées en trottoir! Repéré à <http://www.ecohabitation.com/actualite/nouvelles/nos-bouteilles-transformees-trottoir>
- Pinchou, V. (2018). Liants hydrauliques alternatifs : Des solutions pour réduire l'impact environnemental du béton. Repéré à <http://www.ecohabitation.com/guide/fiches/2-liants-hydrauliques-alternatifs>
- Pro-consigne Québec. (2014). *La consigne au Québec : c'est le temps d'agir! : Guide pratique des faits et avantages du système de consignation*. Repéré à <http://www.pro-consigne.org/data/PCQ-GuideInformatif.pdf>
- Pro-consigne Québec. (2018). La consigne ailleurs au Canada : comment ça marche en Ontario. Repéré à <http://www.pro-consigne.org/fr/nouvelles/la-consigne-ailleurs-au-canada-:-comment-ca-marche-en-ontario-300.htm>
- Quantis. (2015). Analyse environnementale du cycle de vie de projets de commercialisation du verre mixte récupéré via des centres de tri de matières recyclables au Québec : Mesurer la performance environnementale des filières de gestion de fin de vie du verre récupéré au Québec. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/acv-projet-commercialisation-verre-recupere-rapport-complet.pdf>
- RBC Surveyors. (2018). Conversion Tables. Repéré à <http://www.rbcsurveyors.co.uk/building-consultant/conversion-tables/>
- Re-Centre. (s. d.). Que puis-je recycler? Repéré à https://re-centre.ca/?page_id=1034&lang=fr
- Récup Estrie. (2018). Les impacts environnementaux. Repéré à <http://www.recupestrie.com/pourquoi-recuperer/impacts/>
- Récupex. (2014). Où déposer les vêtements et accessoires. Repéré à <http://recupex.ca/recupex-en-bref/points-chute/>
- RECYC-QUÉBEC. (s. d.). *Statistiques de ventes et de récupération des contenants consignés (CRU-tous les adhérents-SAQ inlus) : Année 2006 à 2016*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/tableau-ventes-recuperation-2006-2016.pdf>
- RECYC-QUÉBEC. (2006). *Guide sur la collecte sélective des matières recyclables*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/guide-coll-select-mat-recyc-synth.pdf>

- RECYC-QUÉBEC. (2009a). *Bilan 2008 de la gestion des matières résiduelles au Québec*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2008.pdf>
- RECYC-QUÉBEC. (2009b). *Le système de consignation*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-info-consigne.pdf>
- RECYC-QUÉBEC. (2010a). *Le verre : Fiches informatives*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-info-verre.pdf>
- RECYC-QUÉBEC. (2010b). *Les matières organiques : Fiches informatives*. Repéré à <https://www.RECYC-QUÉBEC.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-info-matieres-organiques.pdf>
- RECYC-QUÉBEC. (2013). *Bilan 2010-2011 de la gestion des matières résiduelles au Québec*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2010-2011.pdf>
- RECYC-QUÉBEC. (2014a). *Bilan 2012 de la gestion des matières résiduelles au Québec*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2012.pdf>
- RECYC-QUÉBEC. (2014b). *Entente portant sur la consignation, la récupération et le recyclage des contenants à remplissage unique de bière*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/consigne-entente-biere.pdf>
- RECYC-QUÉBEC. (2017a). *Bilan 2015 de la gestion des matières résiduelles au Québec*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/bilan-gmr-2015.pdf>
- RECYC-QUÉBEC. (2017b). Guide pour les options de collecte. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/municipalites/matieres-organiques/residus-verts/documents-outils-pratiques-planification/guide-options-collecte>
- RECYC-QUÉBEC. (2017c). Lexique. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/haut-de-page/lexique>
- RECYC-QUÉBEC. (2017d). Programme de consignation des contenants de bière et de boissons gazeuses. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/entreprises-organismes/mieux-gerer/consigne#contribuer-linformation-la-sensibilisation-et-lducation-au-recyclage>
- RECYC-QUÉBEC. (2017e). Régime de compensation pour la collecte sélective des matières recyclables. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/municipalites/collecte-selective-municipale/regime-de-compensation>
- RECYC-QUÉBEC. (2018a). *Article 24*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/consigne-modification-article-24.pdf>
- RECYC-QUÉBEC. (2018b). *Prix moyen par catégorie de matières en dollars la tonne métrique (\$/tm)*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/indice-prix-moyen.pdf>
- Règlement de l'Ontario 13/07 : Programme de consignation de l'Ontario*, L.R.O., c. L.18
- Règlement du Nouveau-Brunswick 99-66*, Lois du Nouveau-Brunswick, c. B-2.2

Règlement sur la compensation pour les services municipaux fournis en vue d'assurer la récupération et la valorisation de matières résiduelles, RLRQ, c. Q-2, r. 10

Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles, RLRQ, c. Q-2, r. 19

Réseau des administrations publiques européennes (EUPAN). (2018). *Document d'orientation européen sur la gestion de la satisfaction client*. Repéré à http://www.eupan.eu/files/repository/20111216161838_EU_Primer_French_FINAL_LR.pdf

Revenu Québec. (2013). *La TVQ, la TPS/TVH et l'alimentation*. Repéré à <https://www.revenuquebec.ca/documents/fr/publications/in/in-216%282013-05%29.pdf>

SAQ. (2016). *À propos du rapport de KPMG « Coûts de la consigne des contenants de boissons alcooliques »*. Repéré à https://www.saq.com/content/SAQ/fr/a-propos/la-saq/nouvelles/A_propos_du_rapport_de_KPMG_Couts_de_la_consigne_des_contenants_de_boissons_alcooliques.html

SAQ. (2017). *Rapport annuel 2017*. Repéré à <https://s7d9.scene7.com/is/content/SAQ/rapport-annuel-2017-fr>

SAQ. (2018). Recherche et développement. Repéré à <https://www.saq.com/content/SAQ/fr/a-propos/responsabilite-societale/valorisation-du-verre/actions-saq-recherche-et-developpement.html>

SAQ. (s. d.). *Valoriser le verre*. Repéré à <https://s7d9.scene7.com/is/content/SAQ/Beton-verre-fr>

Schneider Electric. (2018). Glass industry glossary of terms. Repéré à <http://www.eurotherm.nl/glossary-of-terms#T>

SCHOTT. (2014). *Technical glasses : physical and technical properties*. Repéré à http://www.schott.com/d/tubing/c3fb6f14-beae-4571-82bb-a989308ffe2a/1.1/schott-brochure-technical-glasses_english.pdf

SCHOTT North America, Inc. (2018). Glass tubes for primary pharmaceutical packaging. Repéré à http://www.us.schott.com/tubing/english/special_glass/pharma_packaging.html

Shao, Y., Lefort, T., Moras, S. et Rodriguez, D. (2000). Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, 30(2000), 91-100. Repéré à <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0008884699002136>

Shekhawat, B. S. et Aggarwal, V. (2014). Utilisation of waste glass powder in concrete : A literature Review. *Internaional Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(7), 14822-14826. Repéré à <http://www.rroij.com/open-access/utilisation-of-waste-glass-powder-in-concrete-a-literature-review.pdf>

Shwekat, K. (2015). *Benefit-cost analysis of using class F fly ash-based green cement in masonry units*. Repéré à https://digitalcommons.wayne.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2319&context=oa_dissertations

- Slag Cement Association. (2018a). Mission & history. Repéré à <https://www.slagcement.org/home/missionhistory.aspx>
- Slag Cement Association. (2018b). What is slag cement. Repéré à <https://www.slagcement.org/aboutslagcement/whatisislagcement.aspx>
- Sorensen, J. (2016). UBC researchers explore reducing fly-ash use. Repéré à <https://canada.constructconnect.com/joc/news/technology/2016/06/ubc-researchers-explore-reducing-fly-ash-use-1016722w>
- State of New Hampshire. (2017). *Approximate time it takes for garbage to decompose in the environment*. Repéré à https://www.des.nh.gov/organization/divisions/water/wmb/coastal/trash/documents/marine_debris.pdf
- Statista. (2018). Cement prices in the United States from 2007 to 2017 (in U.S. dollars per metric ton). Repéré à <https://www.statista.com/statistics/219339/us-prices-of-cement/>
- Tangient LCC. (2018). Describe the structure of and bonding in Silicon and Silicon Dioxide. Repéré à <https://chemistryatdulwich.wikispaces.com/Structures+-+Melissa>
- Tashima, M. M., Soriano, L., Payá, J., Monzó, J. et Borrachero, M. V. (2016). Assessment of pozzolanic/hydraulic reactivity of vitreous calcium aluminosilicate (VCAS). *Materials and Design*, 96, 424-430. Repéré à <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.usherbrooke.ca/science/article/pii/S0264127516301836>
- Than, K. (2013). Fossil amber challenges theories about glass. Repéré à <https://news.nationalgeographic.com/news/2013/13/130513-fossil-amber-glass-transition-chemistry-science/>
- The Aluminium Association. (2018). The aluminum can advantage. Repéré à <http://www.aluminum.org/aluminum-can-advantage>
- The Beer Store (TBS). (2015). Every container counts. Repéré à <http://www.thebeerstore.ca/about-us/environmental-leadership/every-container-counts>
- The Regents of the University of California. (2017). What are the uses of crystals? Repéré à <http://scienceline.ucsb.edu/getkey.php?key=4630>
- Thomas, G.P. (2012). Recycling of polyethylene terephthalate (PET or PETE). Repéré à <https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=254>
- Thomas, M. (2007). *Optimizing the use of fly ash in concrete*. Repéré à http://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/is548-optimizing-the-use-of-fly-ash-concrete.pdf
- Tricentris. (s. d.). Pour un béton plus performant. Repéré à <http://verrox.ca/#!/realisations>
- Tucker, E. L., Ferraro, C. C., Laux, S. J. et Townsend, T. G. (2018). Economic and life cycle assessment of recycling municipal glass as a pozzolan in portland cement concrete production. *Ressources*,

- Conservation and Recycling*, 129, 240-247. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344917303592>
- Tufwell Glass. (2016). What is laminated glass? Repéré à <http://tufwellglass.co.uk/view-article.html/28/what-is-laminated-glass>
- United States Environmental Protection Agency (EPA) (2017). Basic Information about Landfill Gas. Repéré sur le site de l'EPA, section Landfill Methane Outreach Program (LMOP) : <https://www.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas>
- United States Geological Survey (USGS). (2017). *Iron and steel slag*. Repéré à https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/iron_&_steel_slag/mcs-2017-fesla.pdf
- Université de Sherbrooke. (s. d.). Bienvenue sur le site de la Chaire SAQ de valorisation du verre dans les matériaux. Repéré à <https://www.usherbrooke.ca/chaire-vvm/fr/>
- Verglass. (s. d.). Miraglass : des propriétés spécifiques. Repéré à <http://produitsverglass.ca/miraglass-applications/>
- Verre Avenir. (s. d.) *Le verre, un matériau réutilisable et recyclable à l'infini*. Repéré à http://www.verre-avenir.fr/var/plain_site/storage/original/application/ec6c5ecd3de096b5f90fcfc9e8b87bf5.pdf
- Victoires Editions. (2015, 3 août). Verre ménager : investissements et volumes. *Environnement magazine.fr*. Repéré à <http://www.environnement-magazine.fr/dechets-recyclage/article/2015/08/03/44621/verre-menager-investissements-volumes.php>
- Ville de Montréal. (s. d.). Équipements. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=7237,75372147&_dad=portal&_schema=PORTAL
- Webb, S. (2009, avril). The best filter media for pool customers. *AQUA Magazine*. Repéré à <https://aquamagazine.com/builder/the-best-filter-media-for-pool-customers.html>
- Yahia, A. (2012). *Optimisation et performance des bétons incorporant de la poudre de verre comme un remplacement partiel du ciment Portland*. (Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec). Repéré à <https://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/6146>

BIBLIOGRAPHIE

- AGC Glass Europe. (2018). Our environmental impact. Repéré à <http://www.agc-glass.eu/en/sustainability/environmental-achievements/environmental-impact>
- Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). (2016). *Déchets : Chiffres-clés édition 2016*. Repéré à <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/dechets-chiffres-cles-edition-2016-8813.pdf>
- British Glass. (s. d.). Glass is infinitely recyclable. Repéré à <https://www.britglass.org.uk/infinately-recyclable>
- Canadian Slag Association. (2009). Technical info. Repéré à <http://canslag.ca/techinfo.html>
- Centre de recherche industrielle du Québec (CRIQ). (2013). *Étude d'impact de la présence du verre, des sacs en plastique et des plastiques émergents dans la collecte sélective au Québec – Phase II*. Repéré à https://www.recyq-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Etude-impact-matieres-CRIQ-sommaire_executif.pdf
- Compactor Management Company. (2018). Advantages and disadvantages of glass recycling. Repéré à <http://www.norcalcompactors.net/advantages-and-disadvantages-of-glass-recycling/>
- Curbside Rewards. (s. d.). *Glass Recycling Challenges*. Repéré à http://curbsiderewards.com/wp-content/themes/recyclelink/Glass_Recycling.pdf
- Deroche Consultants. (2009). Bilan environnemental de la bouteille en verre consigné « 75 cl Alsace » commercialisée dans l'Est de la France par comparaison avec une bouteille en verre à usage unique. Repéré à <http://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/bilan-environnemental-bouteille-en-verre-consigne-alsace-2009.pdf>
- Eco-Emballages et Adelphe. (2014). *Feuille de route verre : Ensemble pour collecter et recycler plus de verre*. Repéré à <https://www.adelphe.fr/sites/default/files/uploadsfiles/Collectivit%C3%A9s/Feuille%20de%20route%20verre/7-PRESENTATION%20VERRE.pdf>
- Éco Entreprises Québec (EEQ). (s. d.a). *Le verre, une matière aux usages multiples*. Repéré à http://www.eeq.ca/wp-content/uploads/Fiche4_debouches_VFF.pdf
- Éco Entreprises Québec (EEQ). (s. d.b). *Verre l'innovation : une solution durable pour 100 % du verre issu de la collecte sélective au Québec*. Repéré à http://www.eeq.ca/wp-content/uploads/fiches-info_plan-verre-innovation_VF.pdf
- Global Reporting Initiative (GRI). (2013). Guide de mise en œuvre. Repéré à <https://www.globalreporting.org/resourcelibrary/French-G4-Part-Two.pdf>
- Gouvernement du Québec. (2011). *Politique québécoise de gestion des matières résiduelles : Plan d'action 2011-2015*. Repéré à <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/matieres/pgmr/presentation.pdf>

- Gouvernement du Québec. (2017). Résumé de la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008. Repéré à http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/resume/index.htm
- Grand Junction's Curbside Recycling Indefinitely (GJCRI). (2016). Colorado companies strive to collect and recycle more glass. Repéré à <http://gjcric.com/colorado-companies-strive-to-collect-and-recycle-more-glass/>
- Groupe Thomas Bellemare Ltée. (2017). Abrasifs & minéraux : Produits. Repéré à <http://www.groupebellemare.com/abrasifs-mineraux/produits>
- Imteaz, M.A., Ali, M.M., Arulrajah, A. (2012). Possible environmental impacts of recycled glass used as a pavement base material. *Waste Management & Research*, 30(9). Repéré à <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22627644>
- Krysteline Group Ltd. (2017). Glass Processing Specialists. Repéré à <http://www.krysteline.com/>
- Lachance, C. (2011). *Alternatives à l'enfouissement des matières résiduelles putrescibles : Que faire des matières putrescibles à la lumière de la 3^e politique québécoise de gestion des matières résiduelles?* (Essai de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec). Repéré à http://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/7257/cufe_Lachance_C__10-11-2011_essai191.pdf?sequence=1
- Le gouvernement du Nouveau-Brunswick. (2018b). Liste de boissons visées par le programme. Repéré à http://www2.gnb.ca/content/gnb/fr/ministeres/egl/environnement/content/terre_et_dechets/content/programme_gestion_des_recipients_a_boissonNB/liste_de_boisson_visees.html
- Norchem. (s. d.). *Silica fume : Technical data sheet*. Repéré à <http://www.norchem.com/pdf/silica-fume-data-sheet.pdf>
- RECYC-QUÉBEC. (2008). *Les contenants de boisson*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/Fiche-info-contenants-boissons.pdf>
- RECYC-QUÉBEC. (s. d.). *Analyse environnementale du cycle de vie de projets de commercialisation du verre mixte récupéré*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/acv-projet-commercialisation-verre-recupere.pdf>
- Société des alcools du Québec (SAQ). (2015). Du verre recyclé pour améliorer nos routes : une idée qui fait du chemin! Repéré à https://www.saq.com/content/SAQ/fr/a-propos/la-saq/nouvelles/Du_verre_recycle_pour_ameliorer_nos_routes_Une_idee_qui_fait_du_chemin.html
- Société Radio-Canada. (2017). Nouvelle technologie : du verre recyclé pur à 99 %. Repéré à <http://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1037366/nouvelle-technologie-verre-reyclage-centre-tri-quebec>
- Soliman, N.A. (2016). *Développement de béton à ultra-hautes performances (BFUP) à base de verre - Vers un béton écologique innovant* (Thèse de doctorat). Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec.

The Glass Recycling co. (TGRC). (2017). Who are we. Repéré à
<http://theglassrecyclingcompany.co.za/who-we-are/>

Tricentris. (s. d.). *Le recyclage du verre au Québec : L'apport de Tricentris*. Repéré à
http://www.eeq.ca/wp-content/uploads/TRICENTRIS_recyclage_verre.pdf

Ville de Montréal. (2016). Complexe environnemental de Saint-Michel (CESM) : centre de tri et de
récupération des matières recyclables. Repéré à
<http://www1.ville.montreal.qc.ca/banque311/content/complex-environnemental-de-saint-michel-cesm-centre-de-tri-et-de-r%C3%A9cup%C3%A9ration-des-mati%C3%A8res->

Ville de Montréal. (s. d.). Recyclable ou non. Repéré à
http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/ARR_VER_FR/MEDIA/DOCUMENTS/DEPLIANT_AIDE-MEMOIRE_2.PDF

Weir, A. (2013). *Updated canadian CCP production & use statistics reveal evolution of coal ash industry in Canada*. Repéré à <http://www.flyash.info/2013/119-Weir-2013.pdf>

World Wide Fund For Nature (WWF). Recycling glass : How it helps environment. Repéré à
http://wwf.panda.org/about_our_earth/teacher_resources/project_ideas/recycling_glass.cfm/

ANNEXE 1 – QUESTIONS POSÉES À FRANÇOIS CARRIER LORS DE LA VISITE DE L’USINE MONTRÉLAISE D’OWENS-ILLINOIS

Le but de la rencontre sera de mieux comprendre l'industrie, les enjeux et les défis de la fabrication du verre au Québec, la demande en verre creux au Québec, et les impacts potentiels de nouvelles applications de valorisation du verre sur cette industrie.

Production annuelle?

- Masse de verre creux produit : 450 tonnes par jour
- Types de produits : Verre creux, principalement brun et clair
- Nombre de récipients produits : 1,6 millions de contenants par jour, dont 20% seront consignés
- Quelle est la concentration des pigments de couleur dans le verre? Les pigments sont en traces.
Le brun est obtenu par l’ajout de carbone dans le mélange de verre. La recette typique pour le verre est : 80 % sable, 10 % calcaire, 10 % bicarbonate de sodium

Ventes et concurrence

- Quels types d’entreprises fournissez-vous? Des entreprises en alimentation et d’embouteillage. Des brasseries québécoises et en Nouvelle-Angleterre.
- Quelle part de marché détenez-vous en tant que fournisseur de récipients de verre pour les entreprises québécoises? Owens-Illinois détient 95 % du marché pour la bière embouteillée au Québec et au Canada, 25% du vin embouteillé au Canada et la majorité du marché de l’alimentation.
- Fournissez-vous des régions autres que le Québec? Marché canadien et de la Nouvelle-Angleterre
- Qui sont vos principaux compétiteurs? (Direct ou indirects) Verriers asiatiques, bouteilles de PET et d’aluminium.
- Quels défis devez-vous surmonter pour faire face à cette compétition? Coûts de production, amélioration continue. Abaisser les coûts en crédits carbone (300 000 \$ en 2013), en provenance de la combustion du gaz naturel et de la combustion des carbonates.

Production

- D’où proviennent vos matières premières? L’extraction est-elle faite au niveau local ou à l’étranger? Le sable provient de St-Canut et est donc local. Le calcaire et le carbonate de sodium proviennent de Valleyfield ou des États-Unis.

- Quels types de résidus de verre récupérés pouvez-vous inclure dans vos recettes? Pour la préparation du verre clair, le calcin doit provenir majoritairement de résidus de verre clair. Pour la préparation de verre ambré, le calcin doit provenir au minimum de résidus de verre ambré.
- Quelle quantité de verre récupéré utilisez-vous en moyenne dans vos procédés? Pour la production de verre ambré : 40 % de calcin est incorporé. Pour la production de verre clair : 20 % de calcin est incorporé.
- Quelle quantité pourriez/voudriez-vous utiliser dans un monde idéal? 100 % Certaines usines de France incorporent déjà 90 % de calcin.
- Qui sont vos fournisseurs de calcin? Majoritairement des récupérateurs et recycleurs ontarien, québécois et néo-brunswickois. Au Québec, le principal fournisseur est 2M Ressources.
 - o Serait-il avantageux d'acheter du verre récupéré de l'extérieur? Oui, une certaine quantité de calcin peut provenir du Vermont, de l'état de New York ou du Maine. Aucune analyse ne permet de savoir s'il serait avantageux économiquement ou environnementalement de faire venir du calcin de plus loin.
- Quelles sont les limites de l'utilisation du verre récupéré dans le contexte québécois?
 - o Prix de la matière première VS secondaire : Le prix du calcin est de 100 \$/tonne, soit sensiblement le même prix que la matière première.
 - o Accessibilité de la matière récupérée : La quantité de calcin ne répond pas à la demande.
 - o Pureté de la matière récupérée : Le verre récupéré sortant des centres de tri n'est pas assez pur pour être incorporé au procédé de fabrication du verre. La plus grande problématique est la présence de porcelaine ou de céramique.
 - o Compétiteurs pour l'achat de la matière récupérée : Certaines entreprises souhaitent acheter des résidus de verre, comme le Groupe Bellemare et Verrox.
 - o Qualité du verre fabriqué à partir de verre recyclé : Même que le verre issu de matières premières.
- Quels types d'énergie sont utilisés dans vos processus? Du gaz naturel et l'électricité
 - o Depuis 2014, avez-vous réussi à atteindre en partie ou en totalité les cibles de réduction d'émissions de gaz à effet de serre et de consommation énergétique fixées par O-I (tel que vu dans le Owens-Illinois, inc. 2014 Sustainability Report)? N/A
- Quel usage faites-vous de l'eau? L'eau de refroidissement est-elle utilisée en boucle fermée? Oui, l'eau de refroidissement est utilisée en boucle fermée.

La récupération et le recyclage du verre au Québec

- Travaillez-vous en partenariat avec RECYC-QUÉBEC ou les centres de tri pour favoriser la récupération et le tri des résidus de verre au Québec? En discussion directe avec ÉEQ, RECYC-QUÉBEC et certains centres de tri. Collabore avec Krysteline
- Qu'est-ce que le Québec pourrait faire pour appuyer votre industrie? Quel serait le mode de récupération idéal selon vous (consigne, dépôt volontaire, collecte sélective, etc.). Sortir le verre de la collecte de porte à porte pêle-mêle. Continuer à innover en matière de récupération et tri. Continuer les partenariats.

O-I international

- Est-ce que le plan d'action de DD de la maison-mère O-I a mené à des résultats intéressants (au Québec ou ailleurs)? Il y a eu des exemples d'amélioration continue un peu partout sur le globe. Voir le rapport de développement durable de O-I.
- Quelles sont les stratégies que vous pouvez/pourriez/aimeriez mettre en œuvre pour atteindre les cibles du plan d'action (en considérant ou non les contraintes technologiques et économiques du Québec)? L'idéal serait d'avoir accès à un maximum de calcin.

Autres thèmes

- À quoi servent les couleurs dans le verre? Le verre ambré sert surtout à la préservation du produit en le protégeant des rayonnements.
- Est-ce que le tri des couleurs est nécessaire avant d'inclure le verre récupéré dans la production des verriers? Pour l'usine de Montréal, oui.
- Les Européens utilisent des verres non triés.
 - o Pourquoi? S.O.
 - o Quelle différence sur la qualité/ sur les propriétés du verre? Le verre mixte ne peut pas permettre la production de verre clair, ambré, vert ou bleu. Il permet la production de verre gris.
- Y a-t-il d'autres particularités de cette industrie au Québec? S.O.

ANNEXE 2 – BILAN DES MODIFICATIONS EFFECTUÉES POUR LA MISE À JOUR DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE DU CIRAIG CONCERNANT LES CONTENANTS DE BIÈRE AU QUÉBEC (Tiré de : CIRAIG, 2015, p. 44)

Section	Paramètre	Principales modifications effectuées lors de la mise à jour		
		Étude initiale	Mise à jour	Commentaires
Système à l'étude	Horizon temporel	2008	2013	n/a
Données primaires	Masses et volumes des CRM/CRU	Voir Tableau 2-8		Mise à jour pour les contenants présents sur le marché avec les données de masses et volumes mesurées pour 2013/2014 (RECYC-QUÉBEC, 2014b). Aucune modification pour les autres contenants prospectifs.
	Nombre de réutilisation des CRM	10	15	Statistique la plus récente de RECYC-QUÉBEC.
	Taux de calcin dans le verre vert en Amérique du Nord.	75 %	50 %	Nouvelle donnée fournie par Owens-Illinois dans un contexte nord-américain. La donnée européenne n'est pas modifiée (75 % de calcin).
	Taux de récupération par la consigne	CRM verre : 95 % CRU verre : 80 % CRU alu : 66 % CRU PET : 70 %	CRM verre : 97.9 % CRU verre : 80 % CRU alu : 67 % CRU PET : 78 %	Statistiques les plus récentes de RECYC-QUÉBEC.
	Taux de récupération par la collecte sélective (CRUs uniquement)	0 % (100 % enfouissement)	6,7 % pour tous les CRU	Statistiques les plus récentes de RECYC-QUÉBEC.
	Lavage stérilisation des CRM (par CRM)	Eau : 0.77 L GN : 0.07 MJ Électricité : 0.03 kWh	Eau : 0.90 L GN : 0.17 MJ Électricité : 0.01 kWh	Nouvelles données fournies par BRQ.
Données secondaires	Donnée de production de PET	Donnée ACC	Donnée <i>ecoinvent</i>	La donnée ACC était incertaine et moins cohérente avec le choix de la base de données d'arrière-plan.
	Donnée de production d'aluminium primaire	Donnée EAA, 2008	Données basées sur les données de l'IAI (2010) et régionalisées par scénario	Statistiques plus récentes et meilleure représentativité du contexte avec les mix électriques et technologiques, ainsi que les marchés régionaux.
	Base de données en arrière-plan	<i>ecoinvent</i> 2.0	<i>ecoinvent</i> 2.2	n/a
	Mix électriques	Mix 2008	Mix 2012 ou 2013	Statistiques plus représentatives du changement d'horizon temporel.
EICV	Méthode d'EICV	Méthode IMPACT 2002+ v2.05.	Méthode IMPACT 2002+ v2.15.	Cette dernière version permet notamment d'intégrer les catégories d'impact <i>Eutrophisation aquatique</i> et <i>Acidification aquatique</i> à la catégorie de dommage <i>Qualité des écosystèmes</i> .
		Méthode « IPCC 2007, 100 ans »	Méthode « IPCC 2013, 100 ans »	Facteurs de PRCs les plus récents, avec rétroaction.

ANNEXE 3 – STATISTIQUES DE VENTES ET DE RÉCUPÉRATION DES CONTENANTS À REMPLISSAGE UNIQUE DE VERRE CONSIGNÉS AU QUÉBEC

Tableau A3.1 Ventes et récupération des contenants à remplissage unique de verre consignés au Québec entre 2006 et 2016 (inspiré de : RECYC-QUÉBEC, s. d., p. 1)

		Nombre de contenants (million de contenants)										
		2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Ventes	5 ¢	15	15	10	12	10	11	10	12	13	14	14
	10 ¢	94	105	113	125	141	138	137	132	134	131	133
	20 ¢	6	6	6	6	6	5	5	3	4	4	5
	Combiné	115	126	129	143	157	154	152	147	151	149	152
Récupération	5 ¢	7	6	4	5	4	4	4	5	5	5	5
	10 ¢	77	83	92	102	109	116	114	111	102	102	100
	20 ¢	4	4	4	3	3	3	2	2	2	2	2
	Combiné	88	93	100	110	116	123	120	118	109	109	107

Tableau A3.2 Poids moyen des contenants de verre à remplissage unique (inspiré de : RECYC-QUÉBEC, 2009b, p. 4)

Type de contenant	Poids d'un contenant (g)
5 ¢	187
10 ¢	230
20 ¢	420

Tableau A3.3 Taux de récupération des contenants à remplissage unique de verre consignés au Québec entre 2006 et 2016

		Poids (tonne métrique)										
		2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Ventes	5 ¢	2805	2805	1870	2244	1870	2057	1870	2244	2431	2618	2618
	10 ¢	21620	24150	25990	28750	32431	31741	31510	30360	30820	30130	30590
	20 ¢	2520	2520	2520	2520	2520	2100	2100	1260	1680	1680	2100
	Combiné	26945	29475	30380	33514	36821	35898	35481	33864	34932	34428	35309
Récupération	5 ¢	1309	1122	748	935	748	748	748	935	935	935	935
	10 ¢	17710	19090	21160	23460	25070	26680	26220	25530	23460	23460	23000
	20 ¢	1680	1680	1680	1260	1260	1260	840	840	840	840	840
	Combiné	20699	21892	23588	25655	27078	28688	27808	27305	25235	25235	24775
	Taux de récupération (%)											
	5 ¢	47	40	40	42	40	36	40	42	38	36	36
	10 ¢	82	79	81	82	77	84	83	84	76	78	75
	20 ¢	67	67	67	50	50	60	40	67	50	50	40
	Combiné	77	74	78	77	74	80	78	81	72	73	70

ANNEXE 4 – SPÉCIFICATIONS PHYSICO-CHIMIQUES DU CALCIN COMME MATIÈRE SECONDAIRE DANS LA PRODUCTION DE CONTENANTS DE VERRE PAR OWENS-ILLINOIS MONTRÉAL (Gracieuseté de F. Carrier, échange de courriels, 9 mars 2018)

OWENS-ILLINOIS GLASS CONTAINERS NORTH AMERICA
Processed Cullet Specification

Printed Copies of this document are considered uncontrolled.



Document No.: Cul-Pro-5	Date Issued: 04/22/14	Page 1 of 3
Prepared By: J. R. Goldman	Approved By: R. B. Hippert	<i>[Signature]</i> 4/22/14

1 General Quality Requirements

Quality Parameter	Amount
Non- Container Glass (lab-ware, borosilicate, window, light bulb, TV, etc.)	<0.010% (<100 ppm)
Bio-Medical Contamination (bio-medical waste or instruments)	None
Hazardous, Toxic, or Controlled Substances	No cullet that has contacted hazardous, toxic, or controlled substances is to be supplied
Inorganic Contamination (refractory, metal carbide, nitrates, chrome bearing materials)	None
Lead in Glass (PbO) – Measurement utilizes a representative cullet stream sample that is pulverized (<2000 microns) and measured via XRF technique.	<0.020% (<200 ppm)

2 Size Specification

	Amount
2.75 inch (70 mm)	100% Passing
U.S. 6 Mesh (3.15 mm)	5% Maximum Passing

3 Moisture and Organic Matter Specification

	Amount
Free Moisture (No Visible Ice or Snow)	< 3.0%
Organic Matter (Paper, wood, plastic, food residue)	<0.15% (<1500 ppm)

4 Metal Contaminant Specification

Contaminant Type	Amount
Magnetic Metal	<0.0005% (<5 ppm)
Non-Magnetic Metal (Aluminum, copper, brass, lead, etc.)	<0.0005% (<5 ppm)

OWENS-ILLINOIS GLASS CONTAINERS NORTH AMERICA

Processed Cullet Specification

Printed Copies of this document are considered uncontrolled.



Document No.: Cul-Pro-5	Date Issued: 04/22/14	Page 2 of 3
-------------------------	-----------------------	-------------

5 Inorganic Contaminant Specification

Contaminant Type	Amount
Ceramics (Cooking ware, pottery, china, milk glass, opal glass, etc.)	< 0.0050% (< 50 ppm)
Aggregate	< 0.0050% (< 50 ppm)

6 Cullet Color Mix Specification

6.1 Flint Cullet

	Target
Flint	> 92.0%
Amber	< 3.0%
Dark Blue	< 0.5%
Georgia Green	< 4.0%
Green	< 2.0%
Other	< 1.0%

6.2 Amber Cullet

	Target
Amber	> 80.0%
Flint+ Georgia Green	<10.0%
Dark Blue	< 3.0%
Green	< 10.0%
Other	< 1.0%

6.3 Green Cullet

	Target
Green	> 75.0%
Amber	< 15.0%
Flint+ Georgia Green	< 18.0%
Dark Blue	< 5.0%
Other	< 1.0%

OWENS-ILLINOIS GLASS CONTAINERS NORTH AMERICA

Processed Cullet Specification

Printed Copies of this document are considered uncontrolled.



Document No.: Cul-Pro-5

Date Issued: 04/22/14

Page 3 of 3

6.4 Mixed Cullet

	Target	Supplier Consistency
Green	< 70.0%	+/- 10%
Amber	< 70.0%	+/- 10%
Flint+ Georgia Green	< 50.0%	+/- 10%
Dark Blue	< 5.0%	
Other	< 1.0%	

6.5 Color Definitions

- A. Green – Defined as any glass container cullet that has a green hue. This includes, but is not limited to, dead leaf green, french green, champagne green, UVA green, and emerald green. Examples of glass colors that are not acceptable as green are georgia green.
- B. Other – Defined as any glass container cullet that has a color which is not specified in the list of acceptable alternative colors for a given cullet type.

7 Reason For Change

- A. New processed cullet specification based upon recommendations from Wine Best Practices.
- B. 03/26/03 – Changed coarse size specification from 2.75” to 1.75”.
- C. Revised to comply with the Global O-I Minimum Processed Cullet Specifications
- D. 06/29/07 - Revised 6.2 Amber Cullet for green glass content from <2.0% to <10.0%
- E. 11/28/12 – Reduced the minimum flint color specs to require 92% flint and add separate Georgia Green spec, raised the allowable LOI to 1500 ppm, and added a lead (PbO) in glass specification of 200 ppm.
- F. Revised the allowed green material in the amber cullet to 10%. This is the correction of an error in the previous version.

ANNEXE 5 – DÉTAILS ET PARAMÈTRES DES SCÉNARIOS DE L'ANALYSE DE CYCLE DE VIE DE QUANTIS SUR LA GESTION DES RÉSIDUS DE VERRE
ISSUS DES CENTRES DE TRI AU QUÉBEC (Tiré de Quantis, 2015, p. 13)

Scénarios		Unité fonctionnelle associée à la fonction secondaire	Produits générés	Produit évité	Paramètre d'équivalence
N°1	Enfouissement du verre	N/A		N/A	N/A
N°2	Utilisation du verre comme matériau de recouvrement journalier dans les LET	Recouvrir $6,2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ d'un lieu d'enfouissement technique pour une couverture correspondant à une épaisseur d'un mètre de sable.	1 kg verre avec une masse volumique apparente ⁽¹⁾ de $1\,620 \text{ kg/m}^3$ Taux de rejet au centre de tri : 0 % Couverture égale à celle du sable.	1,02 kg de sable avec une masse volumique apparente ⁽²⁾ de $1\,650 \text{ kg/m}^3$	Unité volumique : $6,2 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ de surface avec une couverture correspondant à une épaisseur d'un mètre de sable.
N°3	Utilisation du verre comme matériau dans la sous-fondation des chemins d'accès d'un LET	Produire $6,2 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ d'un matériau de remblai pour la sous-fondation d'un chemin d'accès d'un LET.	1 kg verre avec une masse volumique apparente ⁽¹⁾ de $1\,620 \text{ kg/m}^3$ Taux de rejet au centre de tri : 0 %	1,02 kg de gravier avec une masse volumique apparente ⁽²⁾ de $1\,650 \text{ kg/m}^3$	Unité volumique: $6,2 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ de matériau de sous-fondation.
N°4.1	Utilisation du verre comme matière première dans la production d'une bouteille de verre avec contenu recyclé	Produire une bouteille de verre de 2,14 kg.	Une bouteille de verre de 2,14 kg avec un contenu recyclé moyen de 45 % (équivalant à 0,965 kg de verre recyclé et 1,18 kg de verre vierge) Taux de rejets à l'étape de conditionnement ⁽⁴⁾ : 3,5 %	Une bouteille de verre de 2,14 kg avec un contenu 100 % vierge	Unité de produit : Une bouteille de 2,14 kg

Scénarios		Unité fonctionnelle associée à la fonction secondaire	Produits générés	Produit évité	Paramètre d'équivalence
N°4.2	Utilisation du verre comme matière première dans la production d'une laine de verre avec contenu recyclé	Produire 1,93 kg de laine de verre	1,93 kg de laine de verre avec un contenu recyclé moyen de 50 % ^(5, 6) (équivalant à 0,965 kg de verre recyclé et 0,965 kg de verre vierge) Taux de rejets à l'étape de conditionnement ⁽⁴⁾ : 3,5 %	1,93 kg de laine de verre 100 % vierge de résistance thermique équivalente	Unité massique : 1,93 kg de laine de verre
N°4.3	Transformation du verre en poudre de verre utilisée comme ajout cimentaire dans le béton	Produire $3,9 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ d'un ajout cimentaire	0,985 kg de verre micronisé avec une masse volumique spécifique ⁽⁷⁾ de $2\,540 \text{ kg/m}^3$ Taux de rejets à l'étape de micronisation ⁽⁷⁾ : 1,5 %	1,22 kg de ciment Portland avec une masse volumique spécifique ⁽⁸⁾ de $3\,150 \text{ kg/m}^3$	Unité volumique : $3,9 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ d'ajout cimentaire.
N°4.4	Transformation du verre en agrégat de verre utilisé comme agrégat dans le béton	Produire $4,4 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ d'agrégat cimentaire	0,985 kg d'agrégat de verre avec une masse volumique spécifique ⁽⁷⁾ de $2\,490 \text{ kg/m}^3$ Taux de rejet à l'étape de concassage : 1,5 %	1,07 kg de granulat (pierre) avec une masse volumique spécifique ⁽⁹⁾ de $2\,700 \text{ kg/m}^3$	Unité volumique : $4,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ d'agrégat cimentaire

ANNEXE 6 – CENTRES DE TRI QUÉBÉCOIS TESTANT LA TECHNOLOGIE D'IMPLOSION KRYSTELINE (Tiré de ÉEQ, 2018b)



- A)** Tricentris, tri, transformation, sensibilisation, Terrebonne (Lanaudière)
- B)** EBI Environnement, Saint-Paul (Lanaudière)
- C)** Centre de tri de Québec, opéré par Société VIA (Capitale-Nationale)
- D)** Récupération Frontenac, Thetford Mines (Chaudière-Appalaches)
- E)** Régie intermunicipale de traitement des matières résiduelles de la Gaspésie, Grande-Rivière



ANNEXE 7 – LES 16 PRINCIPES DE DÉVELOPPEMENT DURABLE TELS QUE DÉCRITS À L'ARTICLE 6 DE LA LOI SUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE (Extrait de la *Loi sur le développement durable*)

Afin de mieux intégrer la recherche d'un développement durable dans ses sphères d'intervention, l'Administration prend en compte dans le cadre de ses différentes actions l'ensemble des principes suivants:

- a) *«santé et qualité de vie»*: les personnes, la protection de leur santé et l'amélioration de leur qualité de vie sont au centre des préoccupations relatives au développement durable. Les personnes ont droit à une vie saine et productive, en harmonie avec la nature;
- b) *«équité et solidarité sociales»*: les actions de développement doivent être entreprises dans un souci d'équité intra et intergénérationnelle ainsi que d'éthique et de solidarité sociales;
- c) *«protection de l'environnement»*: pour parvenir à un développement durable, la protection de l'environnement doit faire partie intégrante du processus de développement;
- d) *«efficacité économique»*: l'économie du Québec et de ses régions doit être performante, porteuse d'innovation et d'une prospérité économique favorable au progrès social et respectueuse de l'environnement;
- e) *«participation et engagement»*: la participation et l'engagement des citoyens et des groupes qui les représentent sont nécessaires pour définir une vision concertée du développement et assurer sa durabilité sur les plans environnemental, social et économique;
- f) *«accès au savoir»*: les mesures favorisant l'éducation, l'accès à l'information et la recherche doivent être encouragées de manière à stimuler l'innovation ainsi qu'à améliorer la sensibilisation et la participation effective du public à la mise en oeuvre du développement durable;
- g) *«subsidiarité»*: les pouvoirs et les responsabilités doivent être délégués au niveau approprié d'autorité. Une répartition adéquate des lieux de décision doit être recherchée, en ayant le souci de les rapprocher le plus possible des citoyens et des communautés concernés;
- h) *«partenariat et coopération intergouvernementale»*: les gouvernements doivent collaborer afin de rendre durable le développement sur les plans environnemental, social et économique. Les actions entreprises sur un territoire doivent prendre en considération leurs impacts à l'extérieur de celui-ci;
- i) *«prévention»*: en présence d'un risque connu, des actions de prévention, d'atténuation et de correction doivent être mises en place, en priorité à la source;

- j) *«précaution»*: lorsqu'il y a un risque de dommage grave ou irréversible, l'absence de certitude scientifique complète ne doit pas servir de prétexte pour remettre à plus tard l'adoption de mesures effectives visant à prévenir une dégradation de l'environnement;
- k) *«protection du patrimoine culturel»*: le patrimoine culturel, constitué de biens, de lieux, de paysages, de traditions et de savoirs, reflète l'identité d'une société. Il transmet les valeurs de celle-ci de génération en génération et sa conservation favorise le caractère durable du développement. Il importe d'assurer son identification, sa protection et sa mise en valeur, en tenant compte des composantes de rareté et de fragilité qui le caractérisent;
- l) *«préservation de la biodiversité»*: la diversité biologique rend des services inestimables et doit être conservée pour le bénéfice des générations actuelles et futures. Le maintien des espèces, des écosystèmes et des processus naturels qui entretiennent la vie est essentiel pour assurer la qualité de vie des citoyens;
- m) *«respect de la capacité de support des écosystèmes»*: les activités humaines doivent être respectueuses de la capacité de support des écosystèmes et en assurer la pérennité;
- n) *«production et consommation responsables»*: des changements doivent être apportés dans les modes de production et de consommation en vue de rendre ces dernières plus viables et plus responsables sur les plans social et environnemental, entre autres par l'adoption d'une approche d'écoefficient, qui évite le gaspillage et qui optimise l'utilisation des ressources;
- o) *«pollueur payeur»*: les personnes qui génèrent de la pollution ou dont les actions dégradent autrement l'environnement doivent assumer leur part des coûts des mesures de prévention, de réduction et de contrôle des atteintes à la qualité de l'environnement et de la lutte contre celles-ci;
- p) *«internalisation des coûts»*: la valeur des biens et des services doit refléter l'ensemble des coûts qu'ils occasionnent à la société durant tout leur cycle de vie, de leur conception jusqu'à leur consommation et leur disposition finale.